

# Analyse de données au LHC

Nikola Makovec

Ecole thématique IN2P3 d'instrumentation  
"De la physique au détecteur" 2017

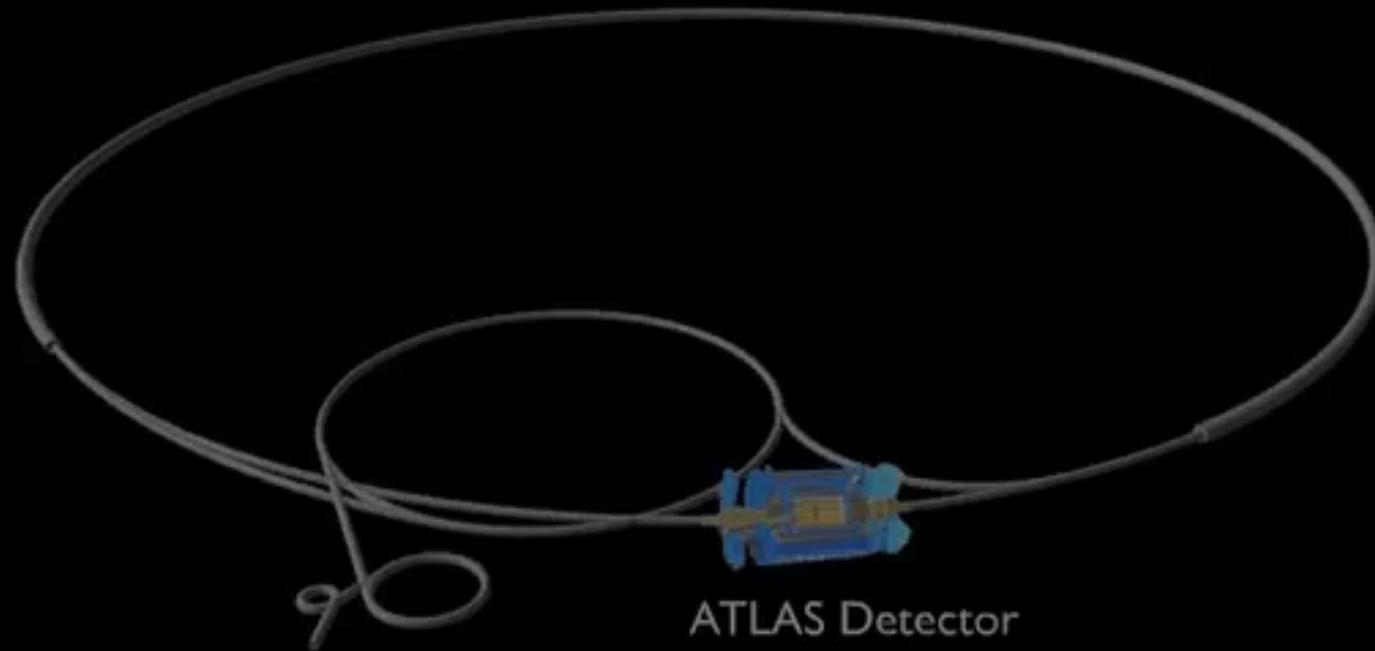
# Analyse de données au ~~LHC~~ avec ATLAS

Nikola Makovec

Ecole thématique IN2P3 d'instrumentation  
"De la physique au détecteur" 2017

PLAY ▶

Large Hadron Collider

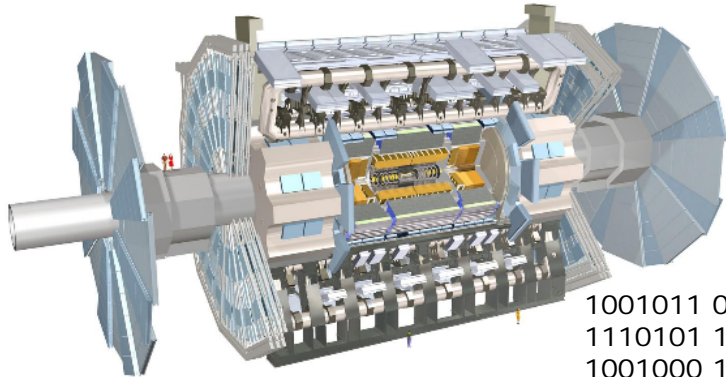


ATLAS Detector

PSB  
PS  
SPS  
LHC

# Des données brutes à la publication

Détecteurs  
(Cours P. Puzo)

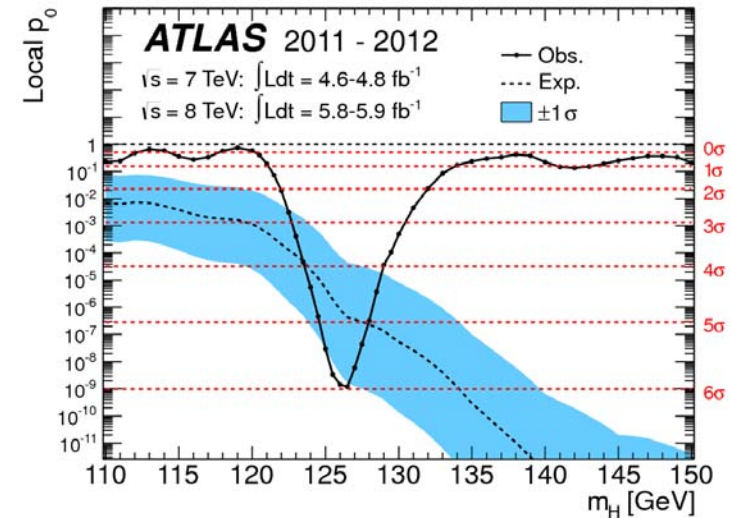


```
1001011 01000101
1110101 10001110
1001000 11101110
1101000 10001001
1010110 00100010
...
```

Analyse  
de données



Physique  
(Cours F. Ledroit)



## ■ Plan:

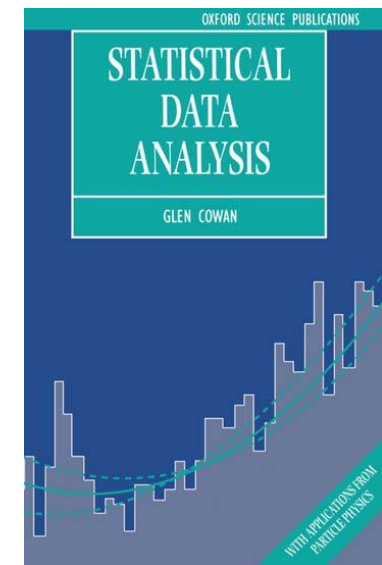
- La reconstruction: vue d'ensemble
- La grille
- La simulation
- La reconstruction: l'exemple des électrons
- Qualité des données
- **Mesure** de la section efficace de prod. du boson Z
- La **recherche** du boson de Higgs
- Organisation

## ■ Parenthèses statistiques:

- La méthode Monte-Carlo
- Estimation de paramètres
- Analyse multivariée
- Calcul de signficance

# Références et sources d'inspiration

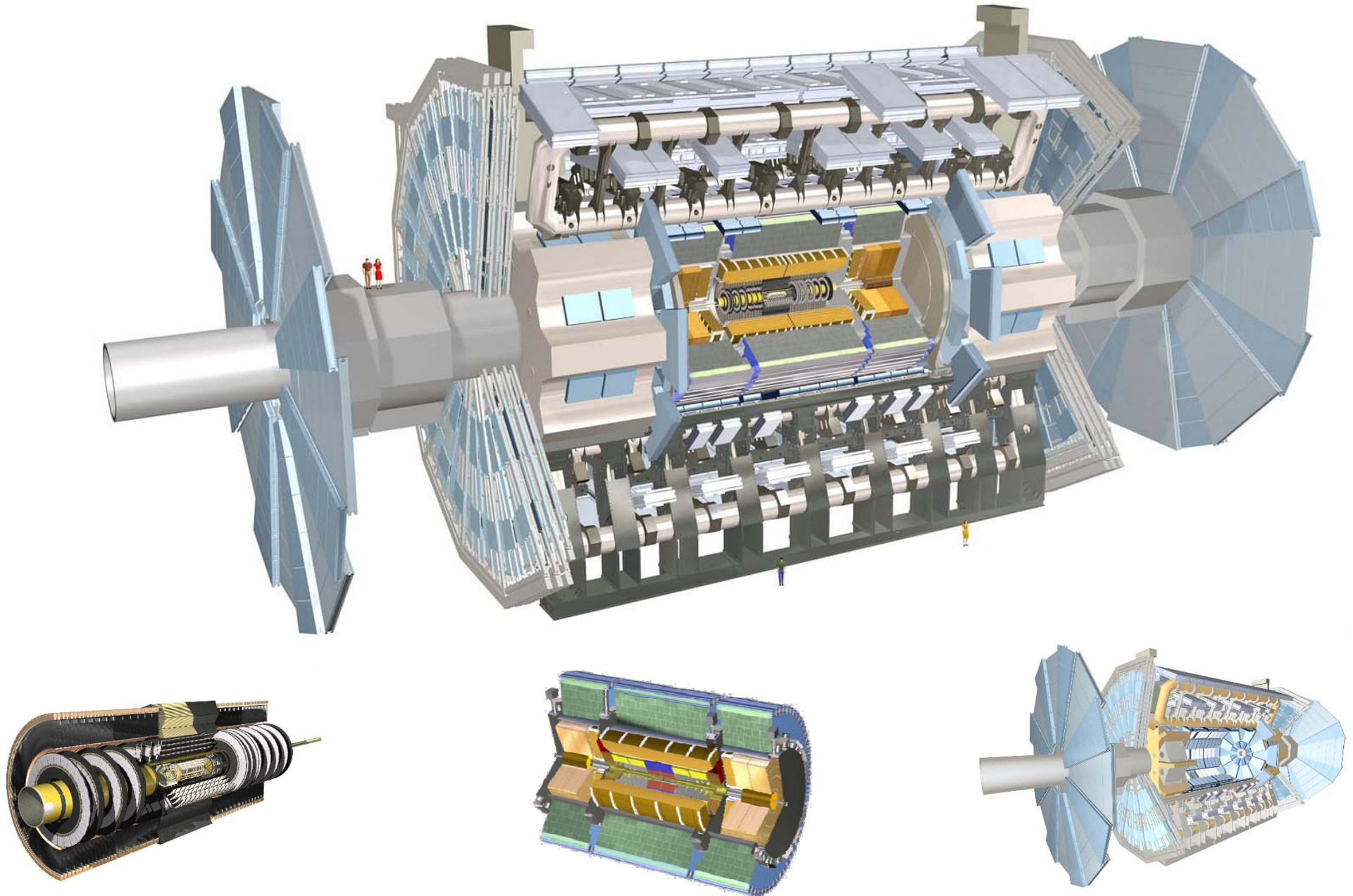
- **L'aventure du grand collisionneur LHC, D. Denegri et al.**
  - Section 10
  - EDP science
- Summer Student Lecture Programme Course
  - <https://indico.cern.ch/category/345/>
  - Cours de A. Sfyrla, J. Boyd et A. Hoecker
- Rencontres d'été de physique de l'infiniment grand à l'infiniment petit
  - <https://indico.in2p3.fr/event/8995/>
  - Cours de C. Biscarat
- Ecole IN2P3 d'instrumentation "de la physique au détecteur" 2014
  - <http://www.in2p3.fr/actions/formation/PhyAuDet14/PhyAuDet14.html>
  - Cours de M. Verderi
- Le CERN en bref:
  - <https://home.cern/fr/about>
- CERN-Fermilab HCP Summer School
  - <http://hcpss.web.cern.ch/hcpss/>
  - Cours de P. Govoni
- **Statistical Data Analysis, G. Cowan**
  - Clarendon Press, Oxford, 1998



# ATLAS

Diameter: 25m  
Longueur: 46m  
Poid: 7000 tonnes

3000 km de cables  
100 millions de canaux



# *Vue transverse simplifiée*

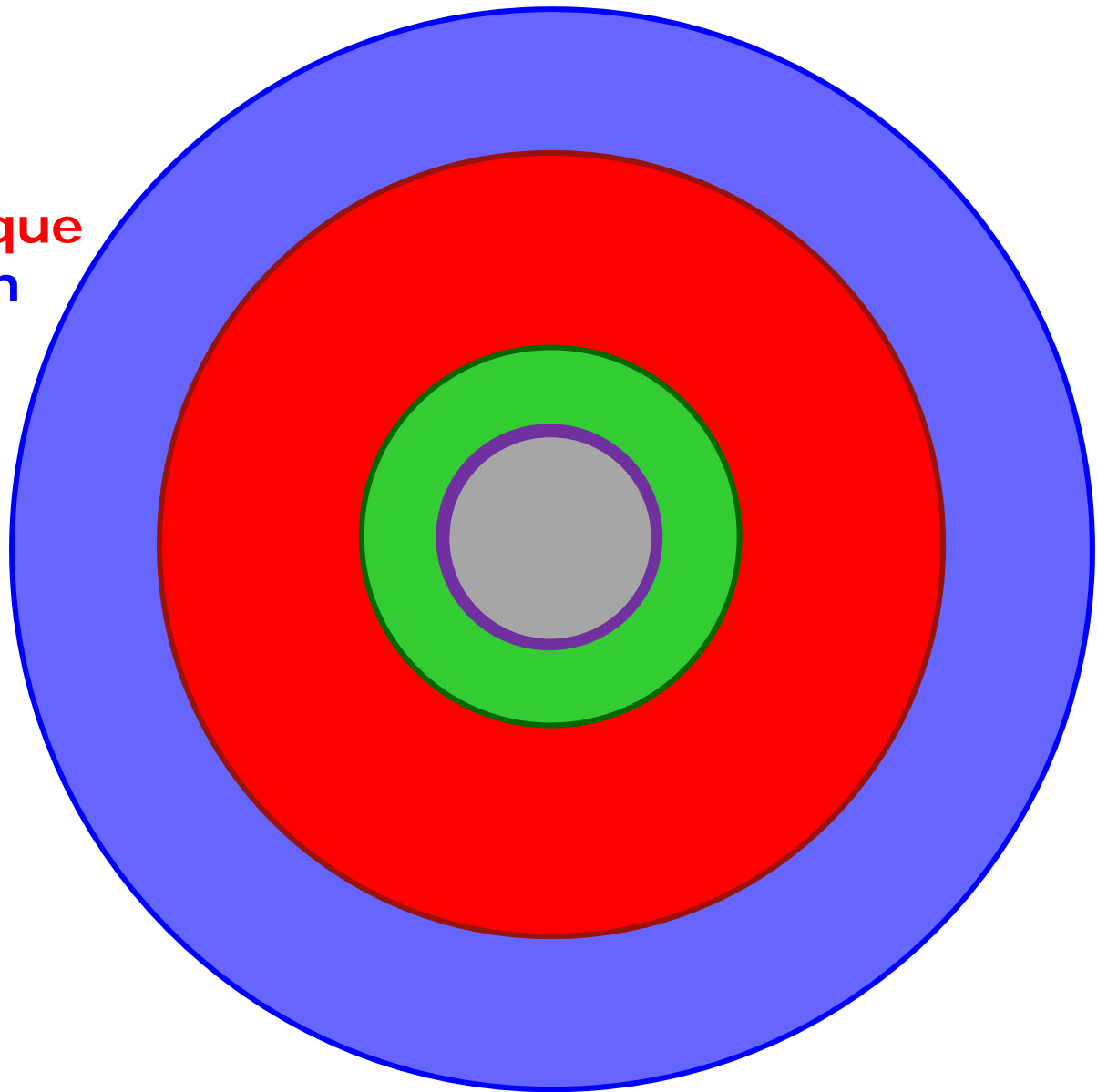
Trajectographe

Solénoïde

Calorimètre EM

Calorimètre Hadronique

Spectromètre à muon





# *La reconstruction: vue d'ensemble*

Objectif de la reconstruction:

Identifier les particules produites lors des collisions et mesurer leurs quadri-vecteurs



# Cinématique

- Impulsion transverse:

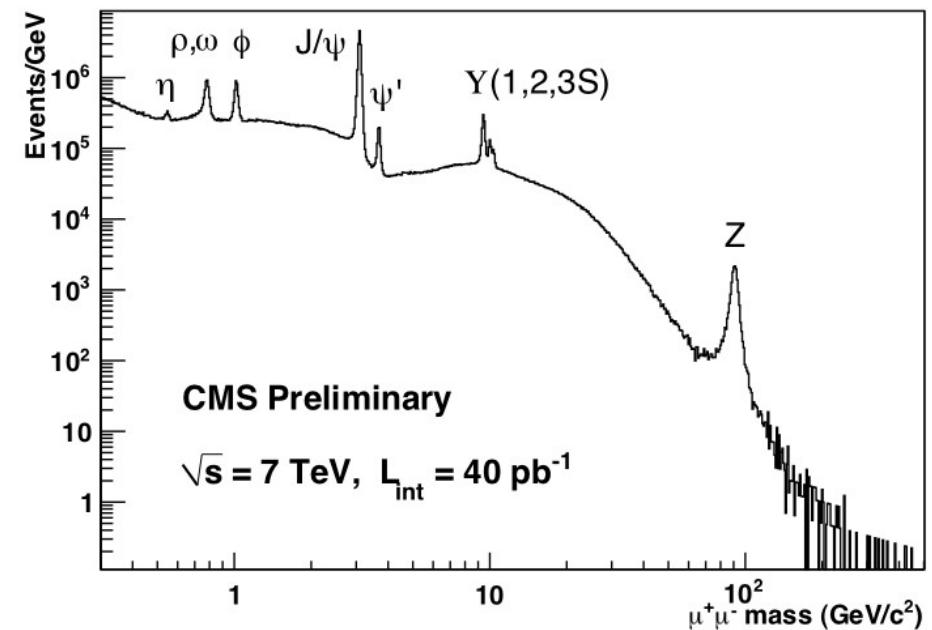
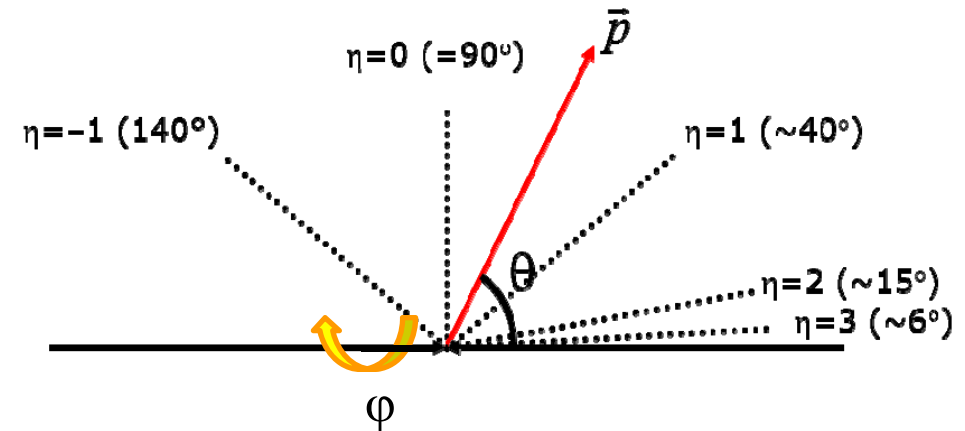
$$p_T = p \sin \theta$$

- Pseudo-rapidité:

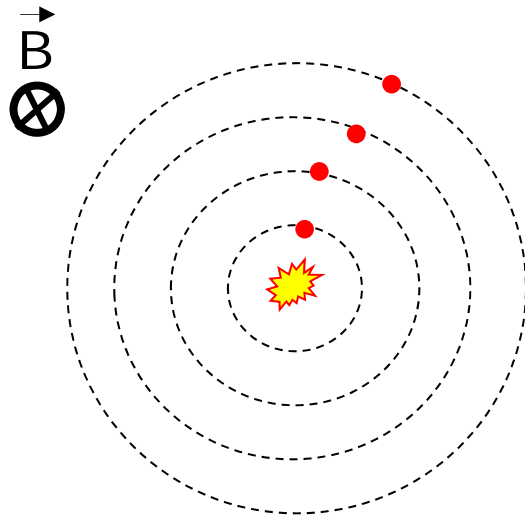
$$\eta = -\ln\left(\tan \frac{\theta}{2}\right)$$

- Masse invariante:

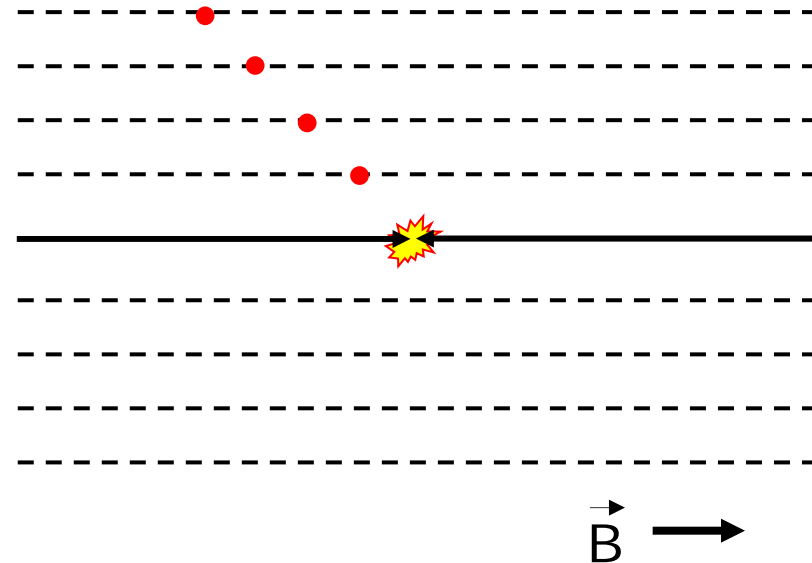
$$m = \sqrt{\sum_i \frac{E_i^2}{c^2} - \sum_i p_i^2}$$



# La reconstruction des traces



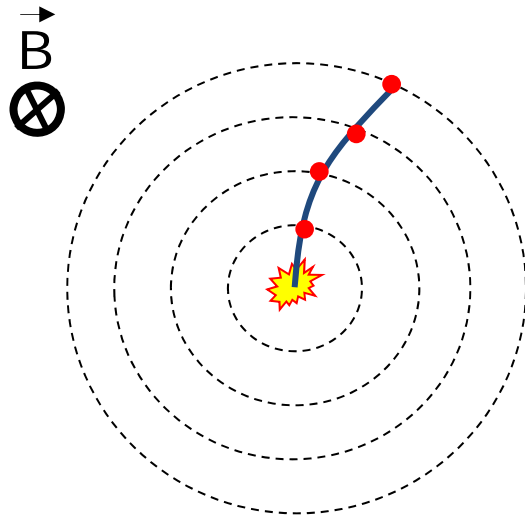
Un électron



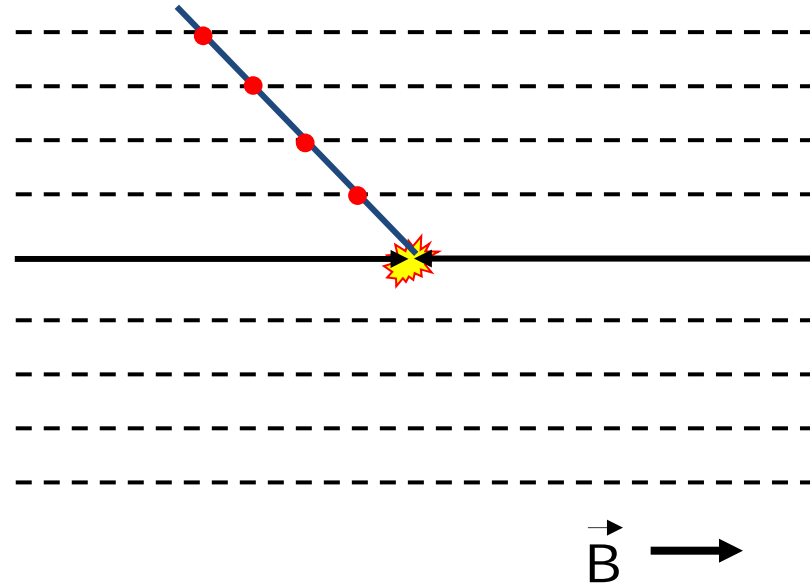
- Pour mesurer la charge et la quantité de mouvement, on va utiliser un aimant  $\vec{p} = \gamma m \vec{v}$
- En effet les particules chargées, lorsqu'elles sont soumises à l'action d'un champ magnétique, ont une trajectoire en forme de spirale autour de la direction du champ.
  - Le sens de rotation donne le signe de la charge.
  - La courbure donne la quantité de mouvement ( $p=RqB$ )



# La reconstruction des traces



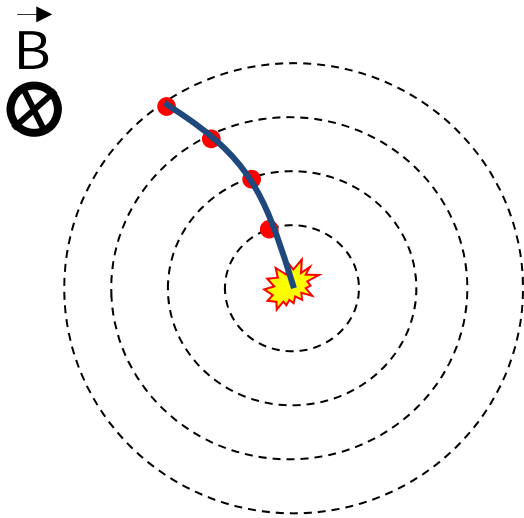
Un électron



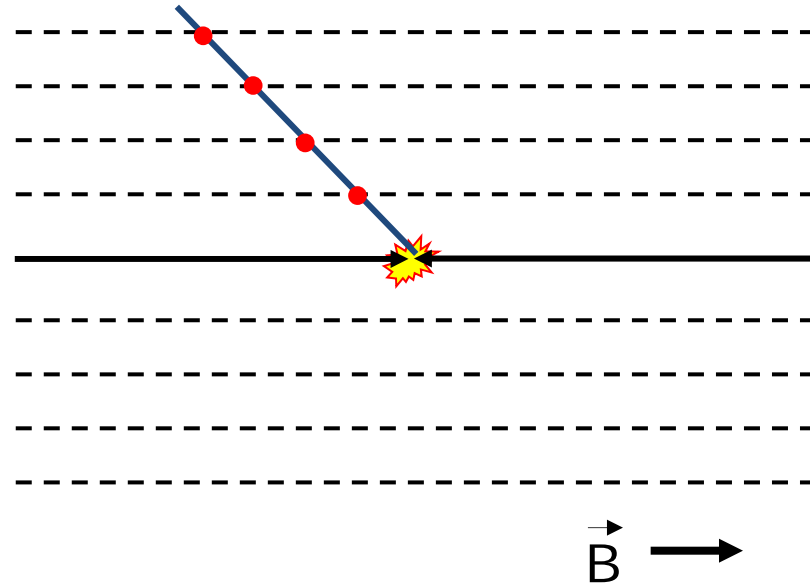
- Pour mesurer la charge et la quantité de mouvement, on va utiliser un aimant  $\vec{p} = \gamma m \vec{v}$
- En effet les particules chargées, lorsqu'elles sont soumises à l'action d'un champ magnétique, ont une trajectoire en forme de spirale autour de la direction du champ.
  - Le sens de rotation donne le signe de la charge.
  - La courbure donne la quantité de mouvement ( $p=RqB$ )



# La reconstruction des traces



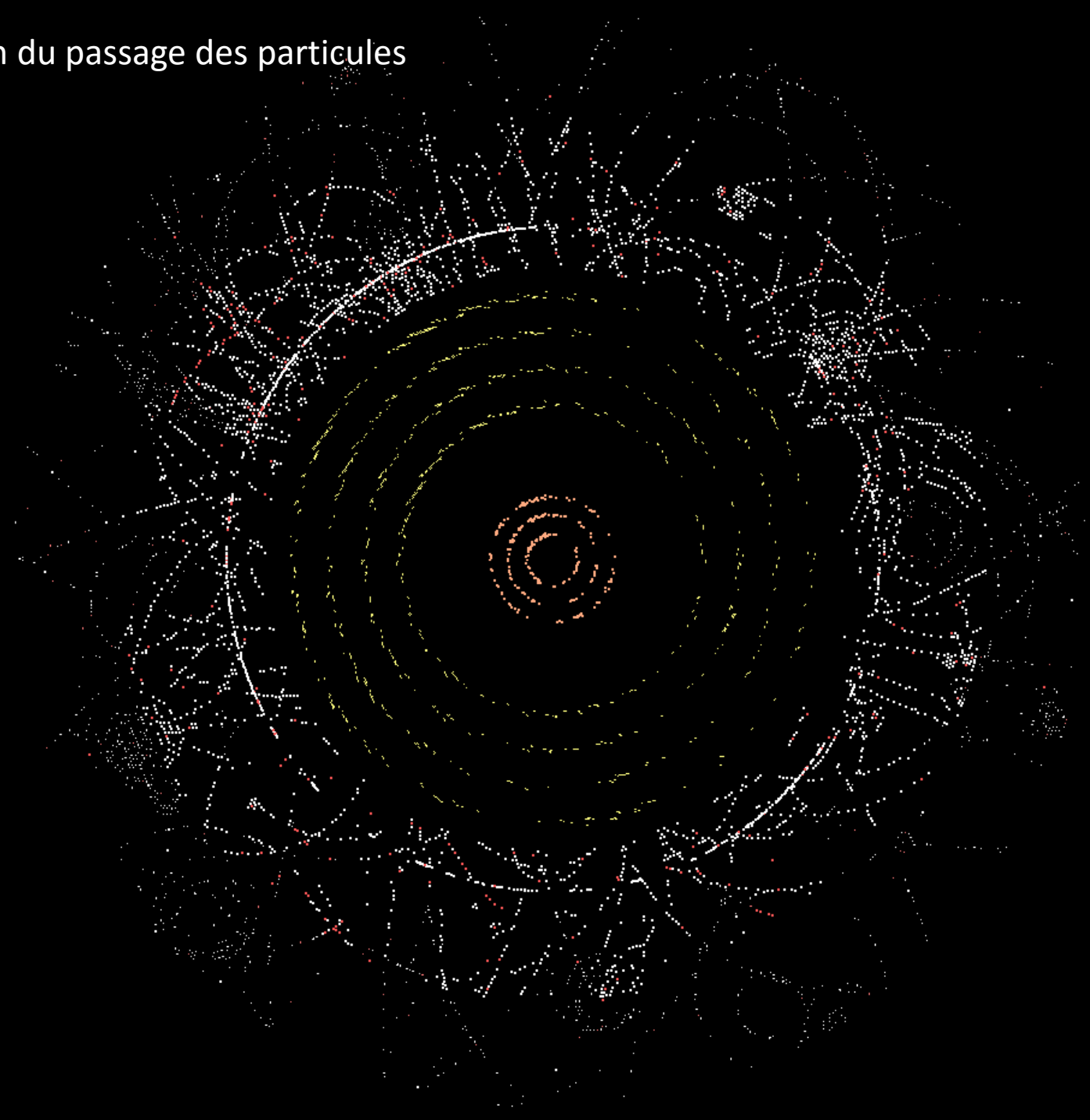
Un anti-électron=positron



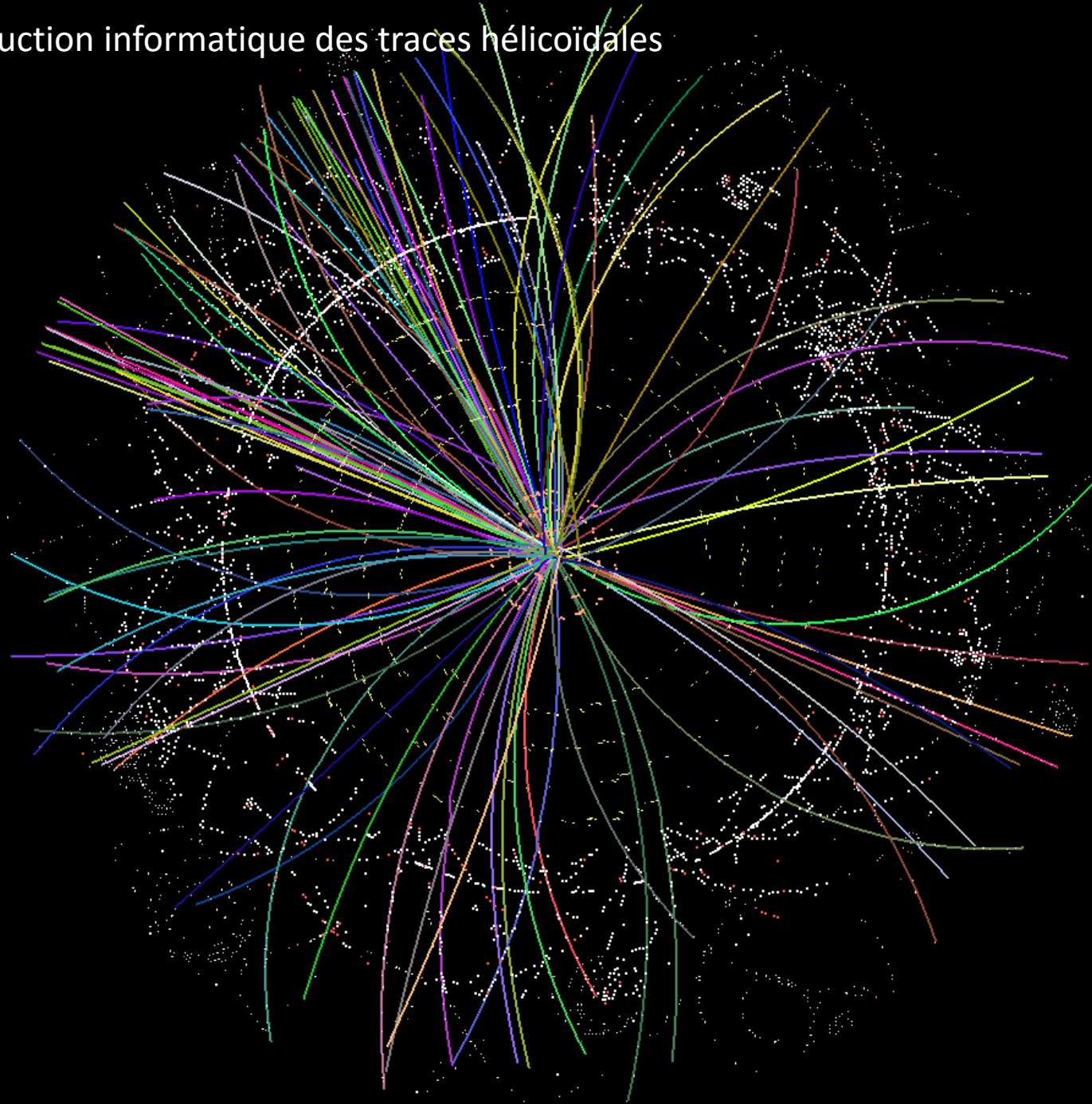
- Pour mesurer la charge et la quantité de mouvement, on va utiliser un aimant  $\vec{p} = \gamma m \vec{v}$
- En effet les particules chargées, lorsqu'elles sont soumises à l'action d'un champ magnétique, ont une trajectoire en forme de spirale autour de la direction du champ.
  - Le sens de rotation donne le signe de la charge.
  - La courbure donne la quantité de mouvement ( $p=RqB$ )



# Détection du passage des particules



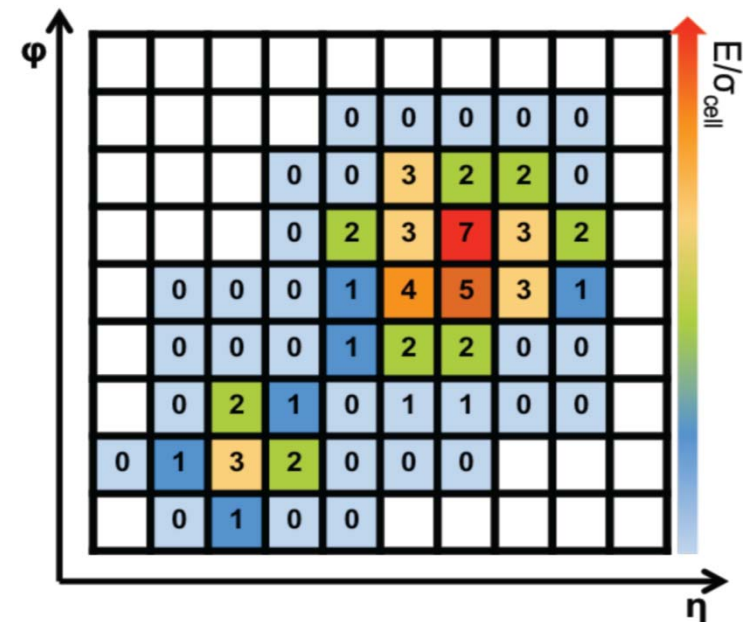
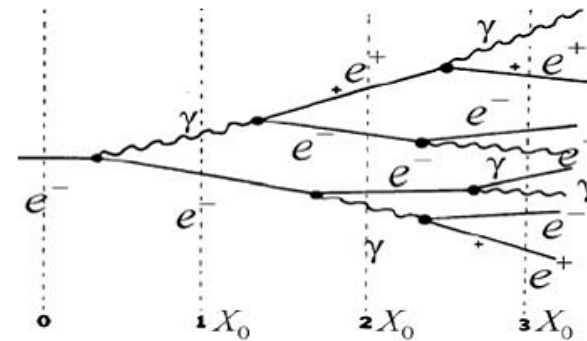
# Reconstruction informatique des traces hélicoïdales



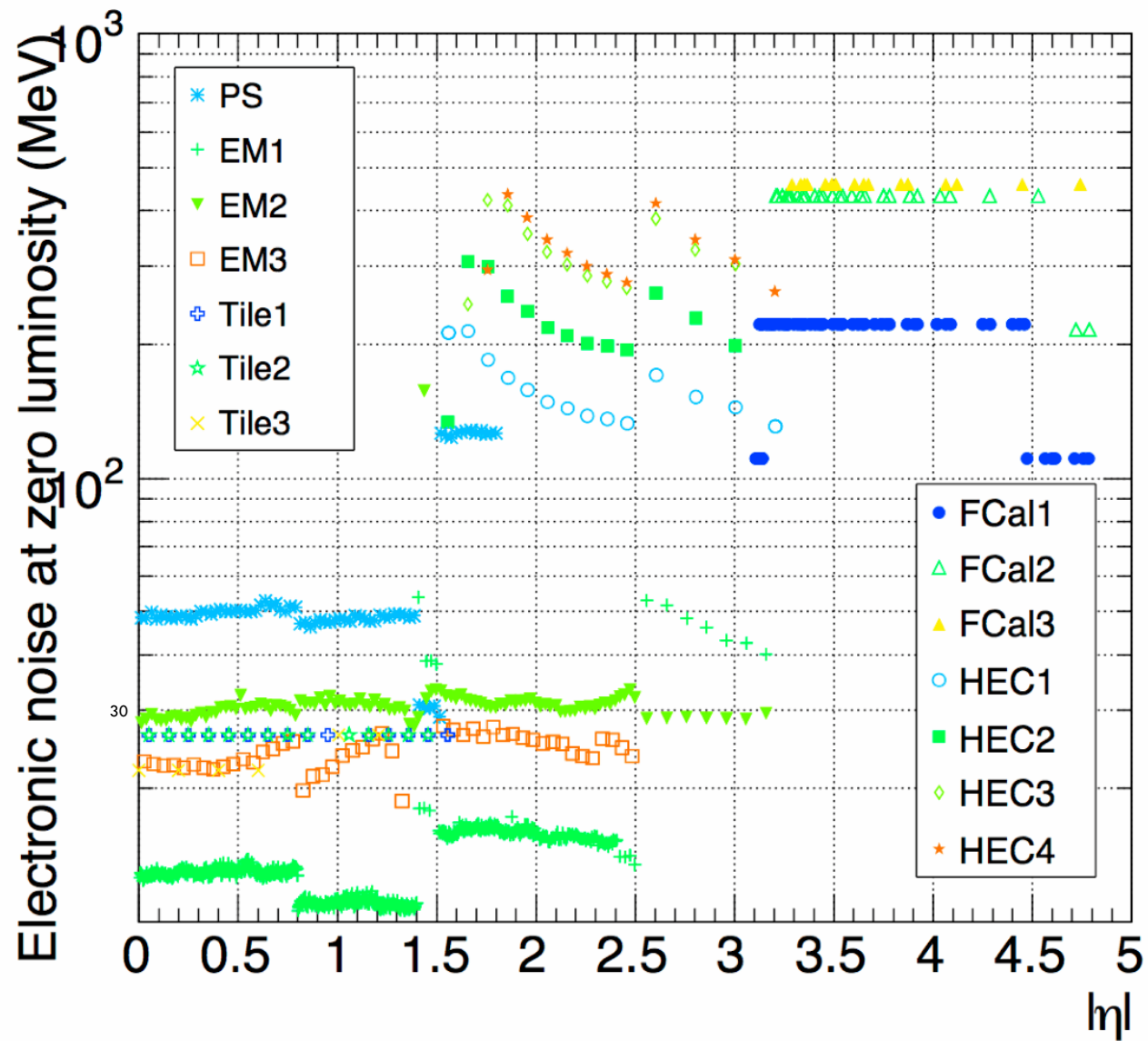
# Agrégation des cellules du calorimètre

- Pour mesurer l'énergie, on arrête la particule avec de la matière  
⇒ **détecteur dense**
- Les particules “filles” ainsi produites vont laisser un signal dans les **parties actives** du calorimètre (ex: par ionization)
- Les calorimètres sont segmentés en cellules
- Agrégation (“Clustering”)
  - But : grouper les cellules proches
  - Sliding window: regroupe des cellules dans un rectangle de taille fixe
  - Topo-clustering: regroupe les cellules qui ont une énergie au-delà du bruit

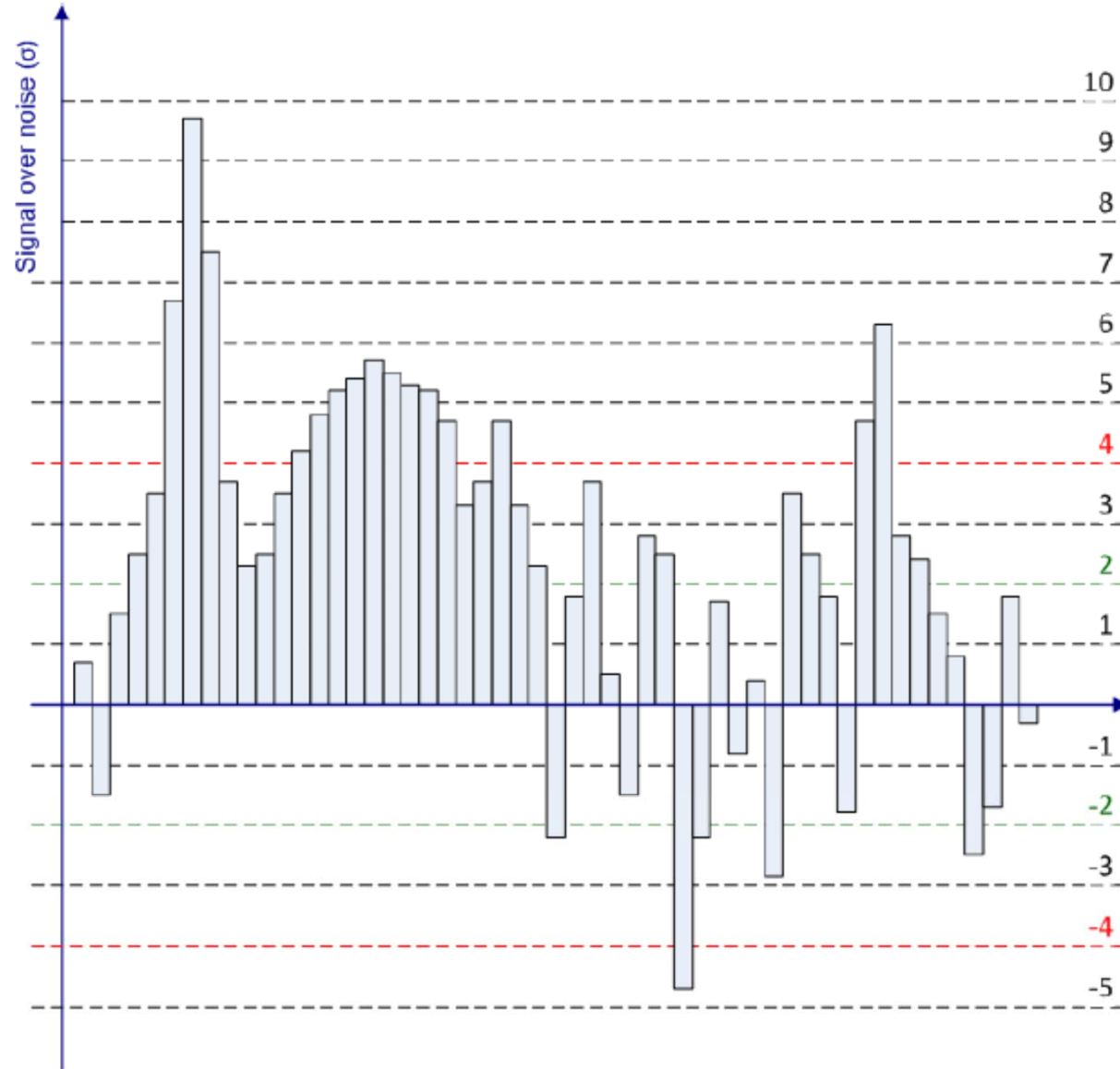
Gerbe électromagnétique

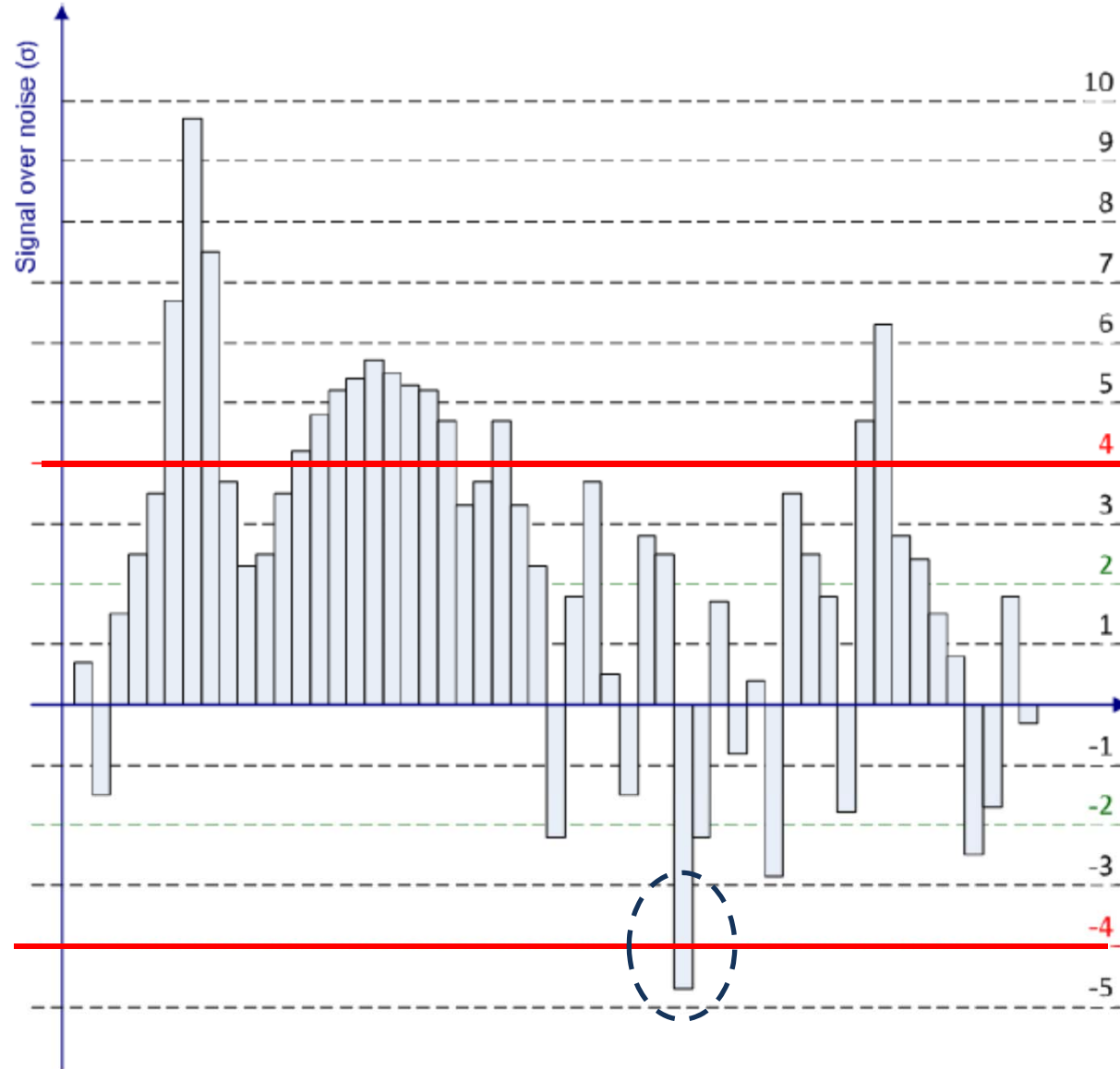


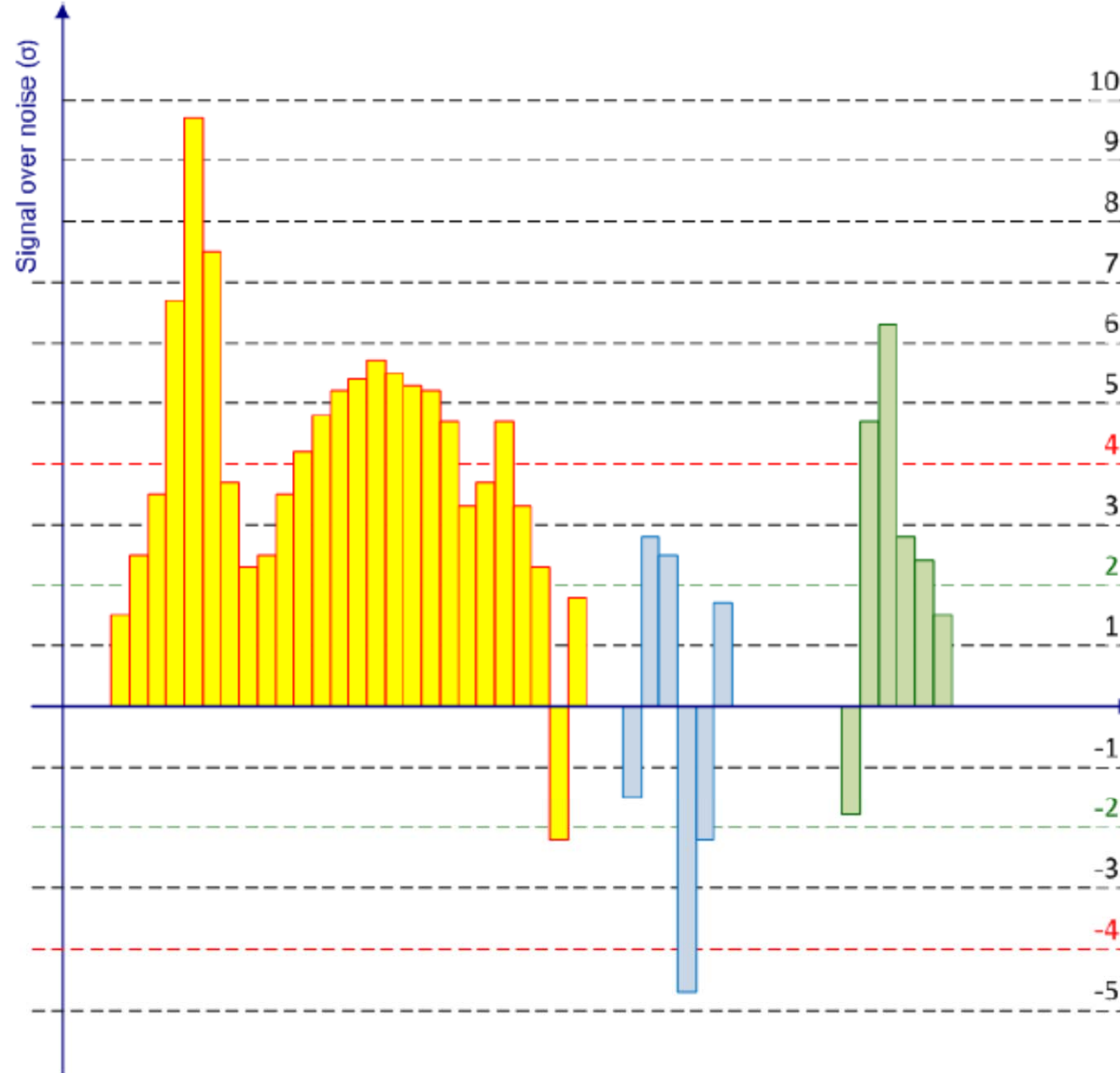
# Bruit du calorimètre

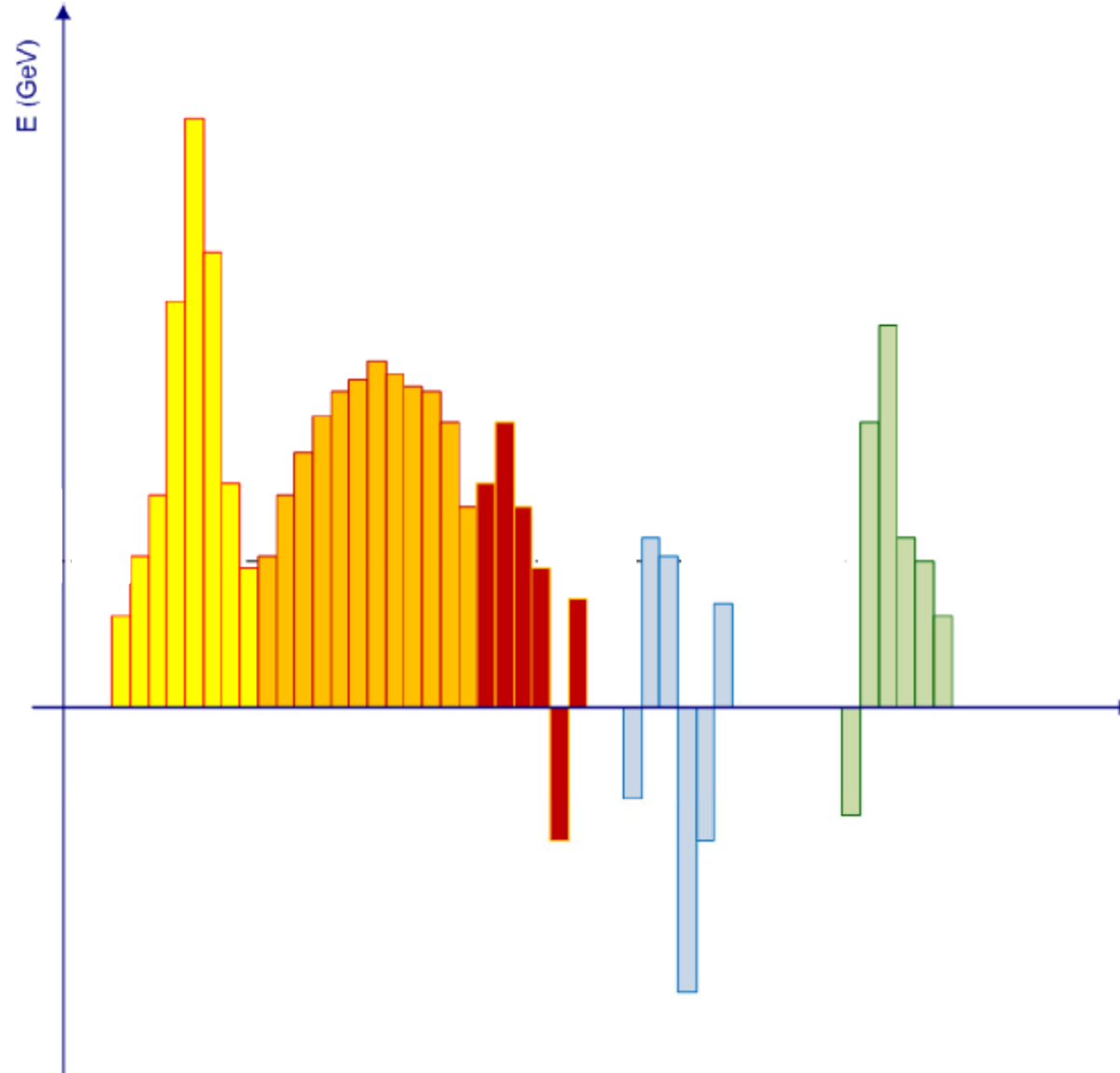












# *Vue transverse simplifiée*

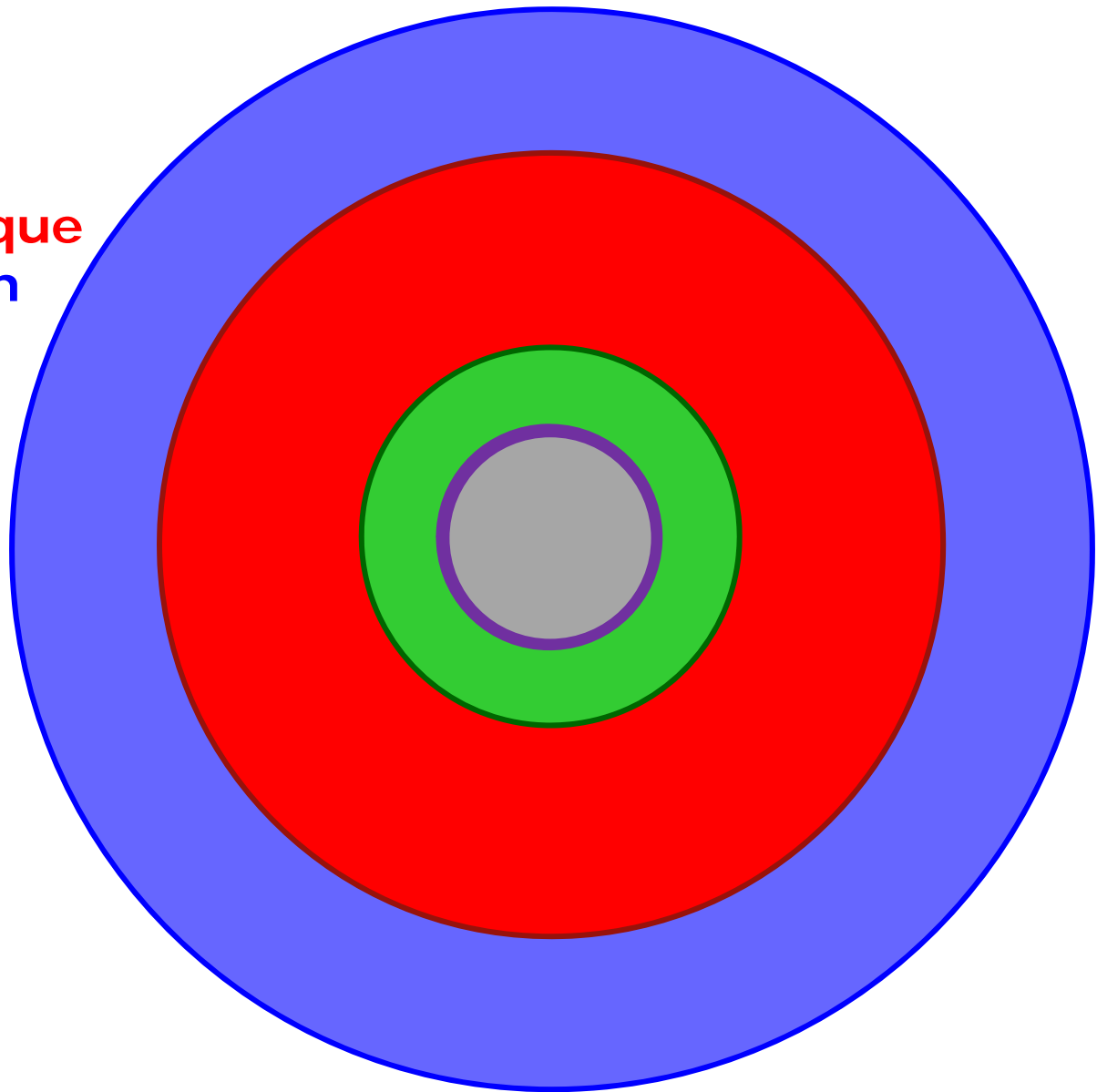
Trajectographe

Solénoïde

Calorimètre EM

Calorimètre Hadronique

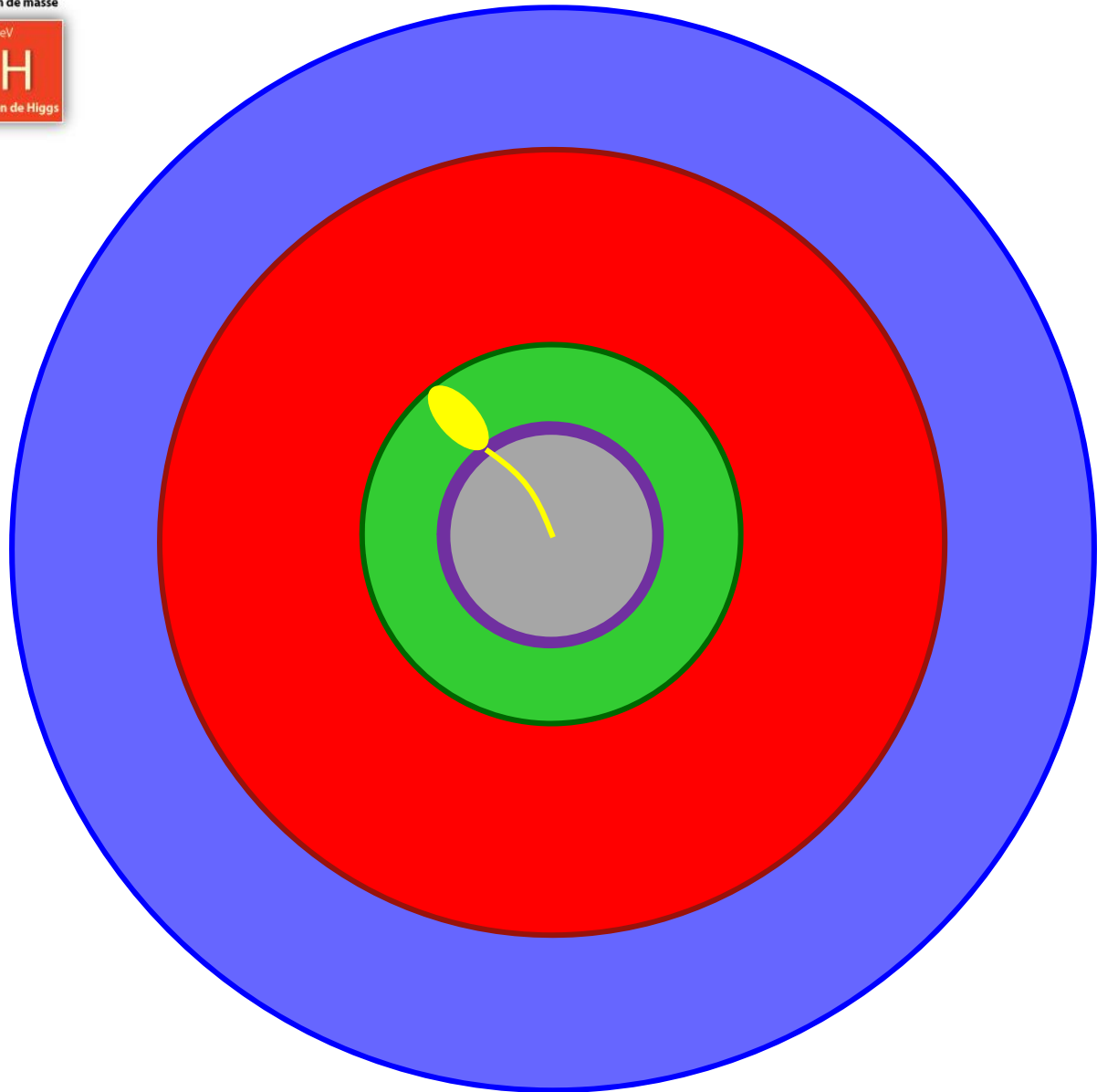
Spectromètre à muon



Que fait-on avec les traces  
et les amas d'énergie dans  
le calorimètre?

# Electron

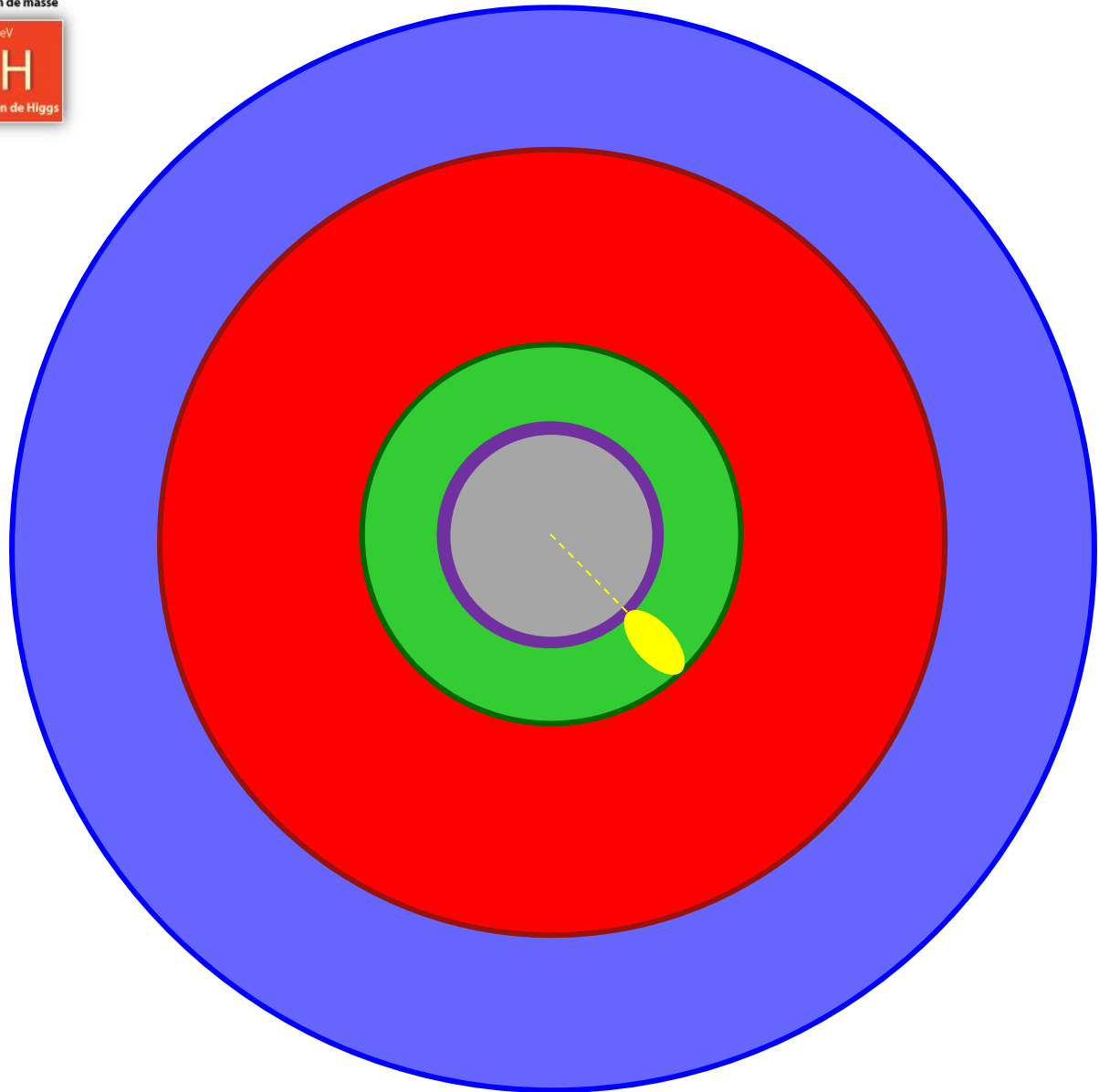
|         | Particules de matière (fermions)  |   |   | Particules d'interactions   | boson de masse                                  |
|---------|---|---|---|---|---|
|         | I   | II  | III   |   |   |
| QUARKS  | 2.4 MeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>u</b><br>up                                  | 1.27 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>c</b><br>charm                              | 171.2 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>t</b><br>top                               | 0<br>0<br>1<br><b><math>\gamma</math></b><br>photon               | 125 GeV<br>0<br>0<br><b>H</b><br>boson de Higgs |
|         | 4.8 MeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>d</b><br>down                                | 104 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>s</b><br>strange                             | 4.2 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>b</b><br>bottom                              | 0<br>0<br>1<br><b>g</b><br>gluon                                  |   |
| LEPTONS | <2.2 eV<br>0<br>1/2<br><b><math>\nu_e</math></b><br>neutrino électronique | <0.17 MeV<br>0<br>1/2<br><b><math>\nu_\mu</math></b><br>neutrino muonique | <15.5 MeV<br>0<br>1/2<br><b><math>\nu_\tau</math></b><br>neutrino tauique | 91.2 GeV<br>0<br>1<br><b><math>Z^0</math></b><br>boson Z          | BOSONS DE JAUGE                                 |
|         | 511 KeV<br>-1<br>1/2<br><b>e</b><br>électron                              | 105.7 MeV<br>-1<br>1/2<br><b><math>\mu</math></b><br>muon                 | 1.777 GeV<br>-1<br>1/2<br><b><math>\tau</math></b><br>tau                 | 80.4 GeV<br>$\pm 1$<br>1<br><b><math>W^\pm</math></b><br>bosons W |   |



Trajectographe  
 Solénoïde  
 Calorimètre EM  
 Calorimètre Hadronique  
 Spectromètre à muon

# Photon

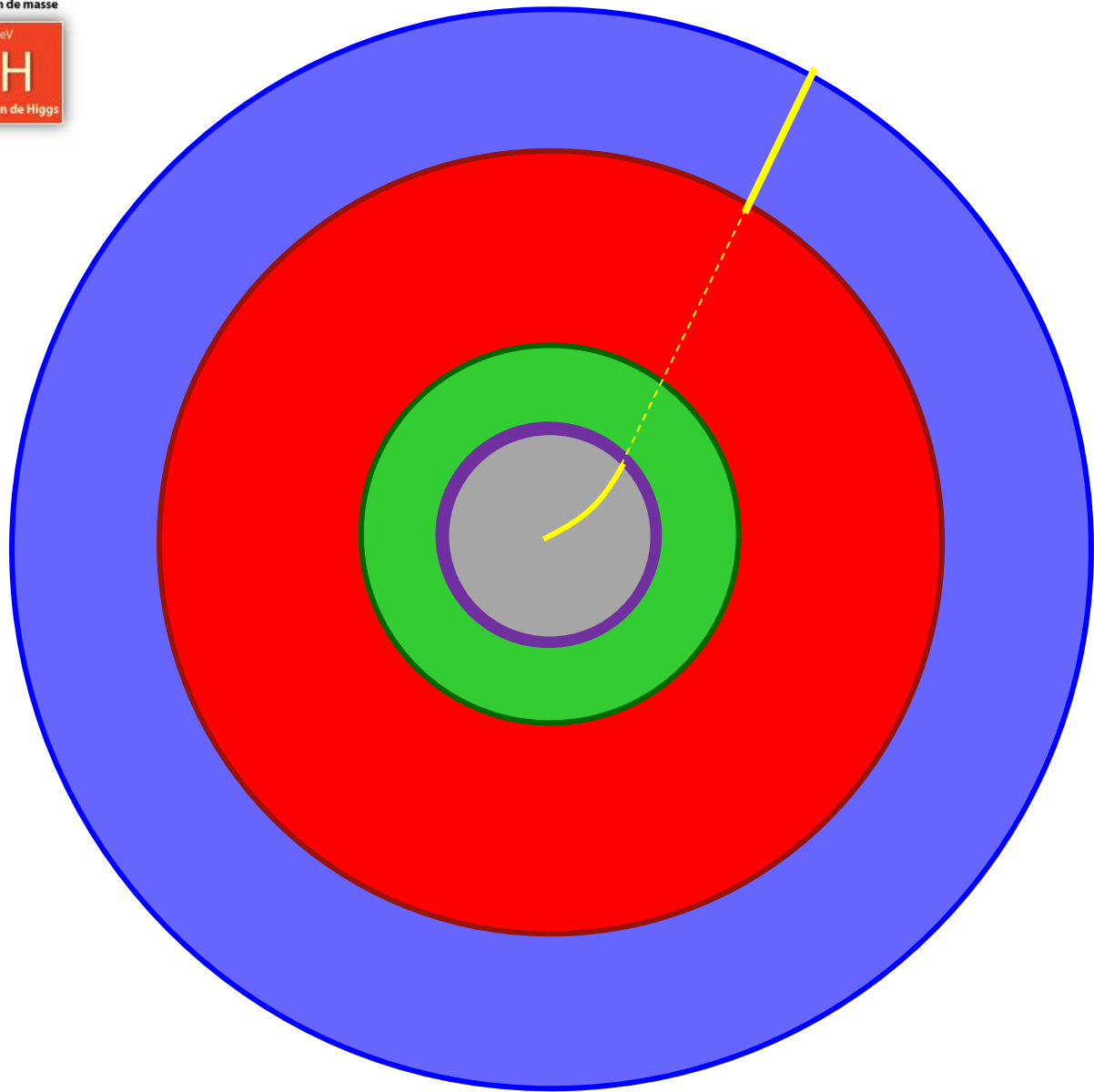
|         | Particules de matière (fermions)  |   |   | Particules d'interaction  | boson de masse                                  |
|---------|---|---|---|---|---|
|         | I   | II  | III   |   |   |
| QUARKS  | 2.4 MeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>u</b><br>up                                  | 1.27 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>c</b><br>charm                              | 171.2 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>t</b><br>top                               | 0<br>0<br>1<br><b><math>\gamma</math></b><br>photon                         | 125 GeV<br>0<br>0<br><b>H</b><br>boson de Higgs |
|         | 4.8 MeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>d</b><br>down                                | 104 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>s</b><br>strange                             | 4.2 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>b</b><br>bottom                              | 0<br>0<br>1<br><b>g</b><br>gluon  |   |
|         | <2.2 eV<br>0<br>1/2<br><b><math>\nu_e</math></b><br>neutrino électronique | <0.17 MeV<br>0<br>1/2<br><b><math>\nu_\mu</math></b><br>neutrino muonique | <15.5 MeV<br>0<br>1/2<br><b><math>\nu_\tau</math></b><br>neutrino tauique | 91.2 GeV<br>0<br>1<br><b>Z<sup>0</sup></b><br>boson Z                       |   |
| LEPTONS | 511 KeV<br>-1<br>1/2<br><b>e</b><br>électron                              | 105.7 MeV<br>-1<br>1/2<br><b><math>\mu</math></b><br>muon                 | 1.777 GeV<br>-1<br>1/2<br><b><math>\tau</math></b><br>tau                 | 80.4 GeV<br>$\pm 1$<br>1<br><b>W<sup><math>\pm</math></sup></b><br>bosons W | BOSONS DE JAUGE                                 |



Trajectographe  
 Solénoïde  
 Calorimètre EM  
 Calorimètre Hadronique  
 Spectromètre à muon

# Muon

|        | Particules de matière (fermions)                                     |  |   | Particules d'interactions                               | boson de masse                                  |
|--------|--|--|---|---|---|
|        | I  | II   | III   |   |   |
| QUARKS | 2.4 MeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>u</b><br>up                             | 1.27 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>c</b><br>charm                       | 171.2 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>t</b><br>top                       | 0<br>0<br>1<br><b>γ</b><br>photon                       | 125 GeV<br>0<br>0<br><b>H</b><br>boson de Higgs |
|        | 4.8 MeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>d</b><br>down                           | 104 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>s</b><br>strange                      | 4.2 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>b</b><br>bottom                      | 0<br>0<br>1<br><b>g</b><br>gluon                        |   |
|        | <2.2 eV<br>0<br>1/2<br><b>ν<sub>e</sub></b><br>neutrino électronique | <0.17 MeV<br>0<br>1/2<br><b>ν<sub>μ</sub></b><br>neutrino muonique | <15.5 MeV<br>0<br>1/2<br><b>ν<sub>τ</sub></b><br>neutrino tauique | 91.2 GeV<br>0<br>1<br><b>Z<sup>0</sup></b><br>boson Z   |   |
|        | 511 KeV<br>-1<br>1/2<br><b>e</b><br>électron                         | 105.7 MeV<br>-1<br>1/2<br><b>μ</b><br>muon                         | 1.777 GeV<br>-1<br>1/2<br><b>τ</b><br>tau                         | 80.4 GeV<br>±1<br>1<br><b>W<sup>±</sup></b><br>bosons W |   |
|        |  |  |   | BOSONS DE JAUGE   |   |
|        |  |  |   |   |   |



$$\tau_{\mu} \sim 2 \mu\text{s}$$

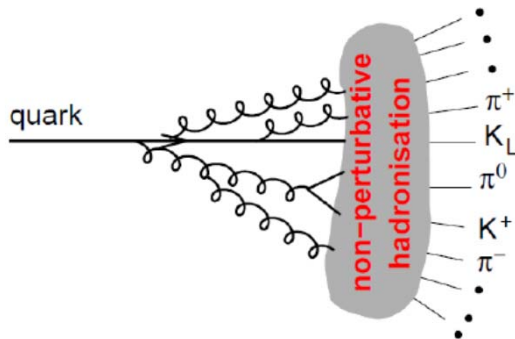
$$\rightarrow c\tau_{\mu} \sim 600\text{m}$$

- Trajectographe
- Solénoïde
- Calorimètre EM
- Calorimètre Hadronique
- Spectromètre à muon

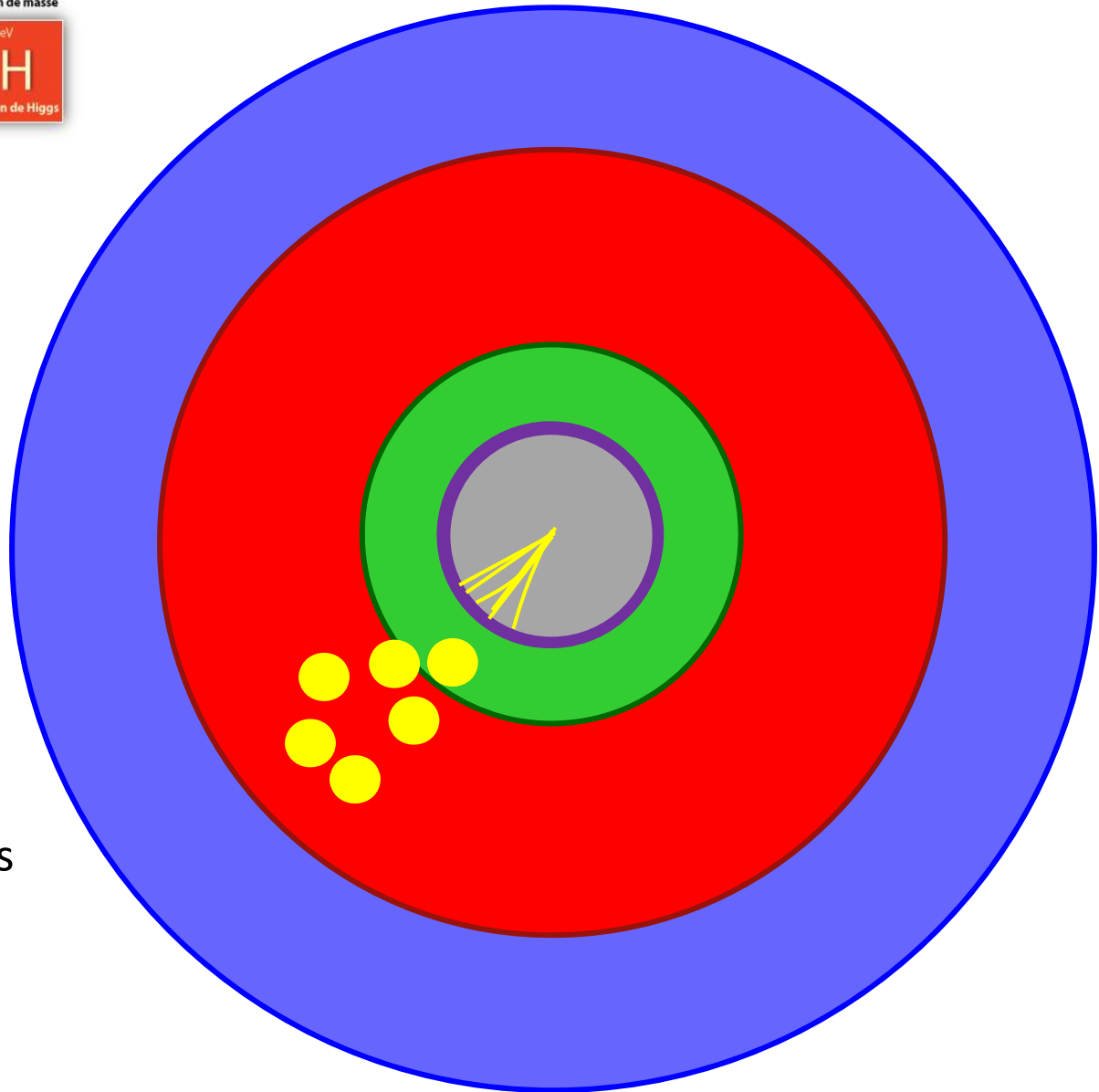


# Jets

| Particules de matière (fermions)  |   |   | Particules d'interactions   |   |
|---|---|---|---|---|
| 2.4 MeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>u</b><br>up                                  | 1.27 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>c</b><br>charm                              | 171.2 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>t</b><br>top                               | 0<br>0<br>1<br><b><math>\gamma</math></b><br>photon               | boson de masse<br>125 GeV<br>0<br>0<br><b>H</b><br>boson de Higgs |
| 4.8 MeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>d</b><br>down                                | 104 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>s</b><br>strange                             | 4.2 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>b</b><br>bottom                              | 0<br>0<br>1<br><b>g</b><br>gluon                                  |   |
| <2.2 eV<br>0<br>1/2<br><b><math>\nu_e</math></b><br>neutrino électronique | <0.17 MeV<br>0<br>1/2<br><b><math>\nu_\mu</math></b><br>neutrino muonique | <15.5 MeV<br>0<br>1/2<br><b><math>\nu_\tau</math></b><br>neutrino tauique | 91.2 GeV<br>0<br>1<br><b>Z<sup>0</sup></b><br>boson Z             |   |
| 511 KeV<br>-1<br>1/2<br><b>e</b><br>électron                              | 105.7 MeV<br>-1<br>1/2<br><b><math>\mu</math></b><br>muon                 | 1.777 GeV<br>-1<br>1/2<br><b><math>\tau</math></b><br>tau                 | 80.4 GeV<br>$\pm 1$<br>1<br><b>W<math>^\pm</math></b><br>bosons W |   |



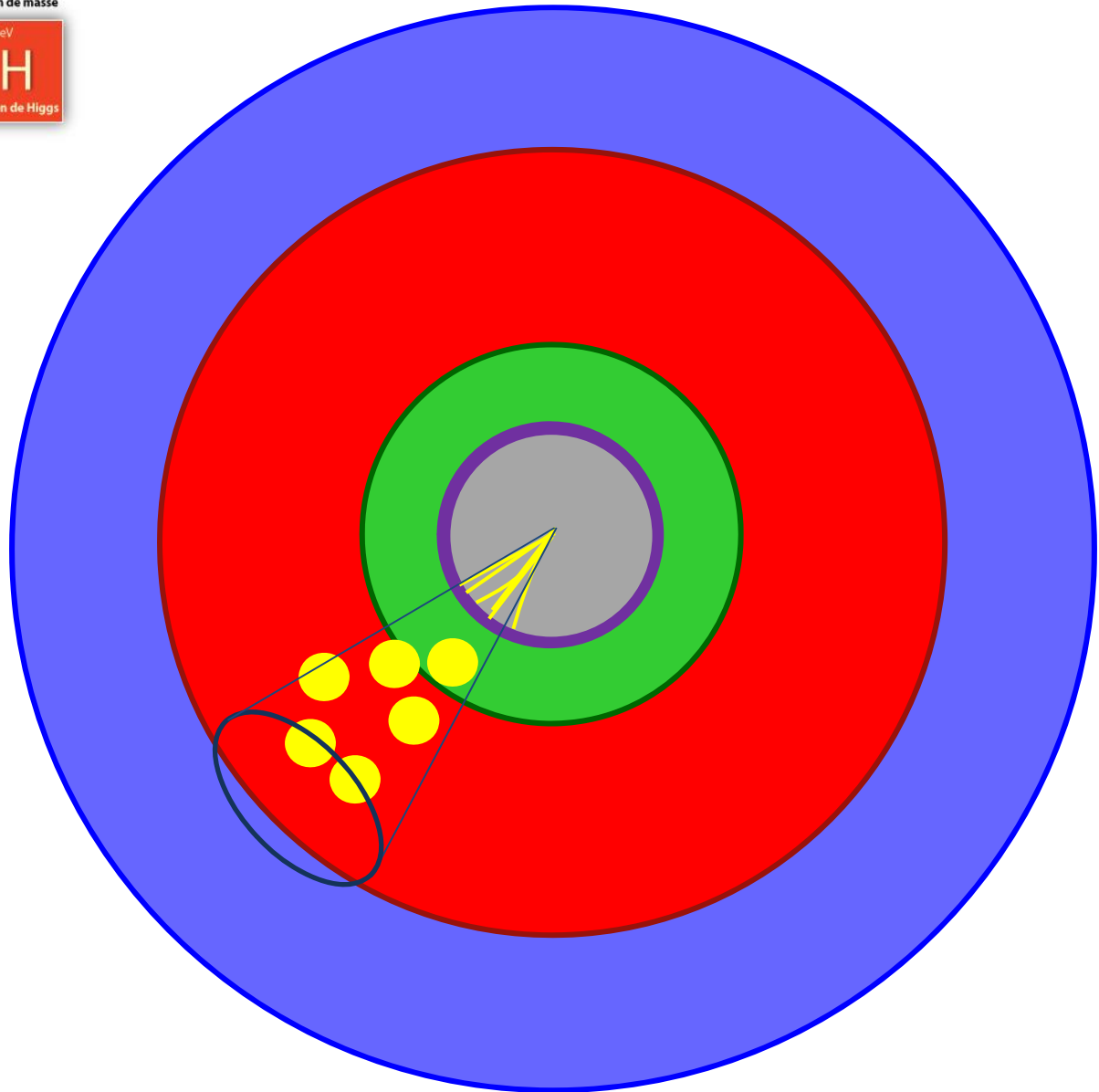
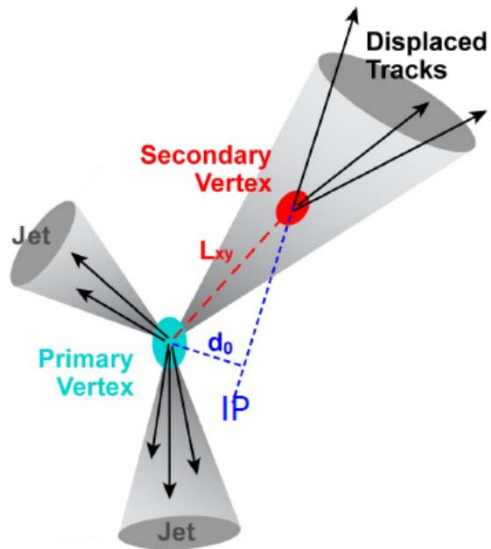
Quarks/gluons ne peuvent pas être observés à l'état libres (confinement)  
→ jets de hadrons



# Jets de quarks $b$

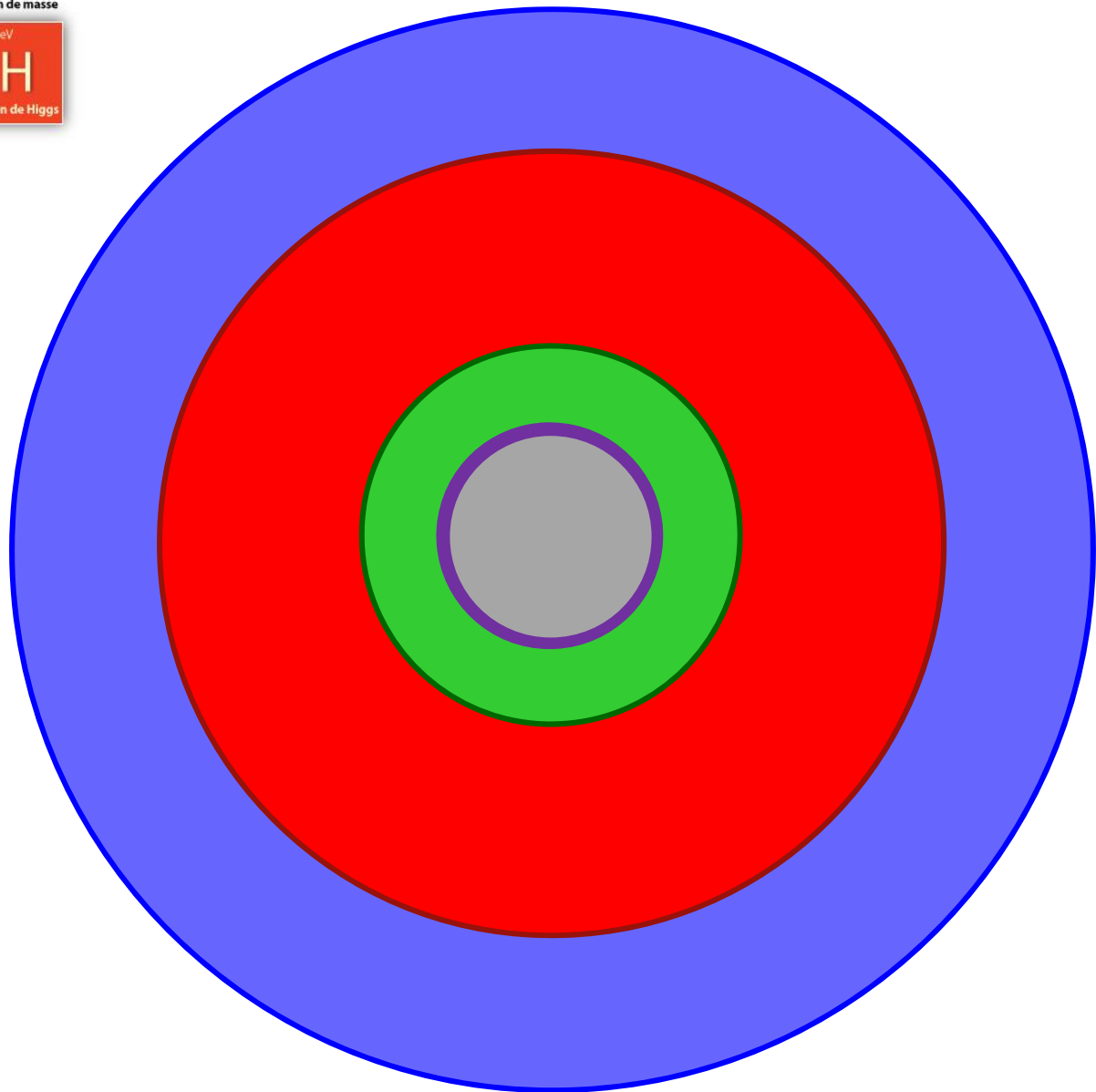
|         | Particules de matière (fermions)                        |   |   | Particules d'interactions   |   |
|---------|---|---|---|---|---|
|         | I   | II  | III   |   | boson de masse  |
| QUARKS  | 2.4 MeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>u</b><br>up                | 1.27 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>c</b><br>charm            | 171.2 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>t</b><br>top             | 0<br>0<br>1<br>$\gamma$<br>photon                                 | boson de masse<br>125 GeV<br>0<br>0<br><b>H</b><br>boson de Higgs |
|         | 4.8 MeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>d</b><br>down              | 104 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>s</b><br>strange           | 4.2 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>b</b><br>bottom            | 0<br>0<br>1<br><b>g</b><br>gluon                                  |   |
|         | <2.2 eV<br>0<br>1/2<br>$\nu_e$<br>neutrino électronique | <0.17 MeV<br>0<br>1/2<br>$\nu_\mu$<br>neutrino muonique | <15.5 MeV<br>0<br>1/2<br>$\nu_\tau$<br>neutrino tauique | 0<br>0<br>1<br>$Z^0$<br>boson Z                                   |   |
| LEPTONS | 511 KeV<br>-1<br>1/2<br><b>e</b><br>électron            | 105.7 MeV<br>-1<br>1/2<br>$\mu$<br>muon                 | 1.777 GeV<br>-1<br>1/2<br>$\tau$<br>tau                 | 80.4 GeV<br>$\pm 1$<br>1<br><b>W<math>^\pm</math></b><br>bosons W | BOSONS DE JAUGE   |

B-hadrons:  $c\tau_b \sim 500\mu\text{m}$

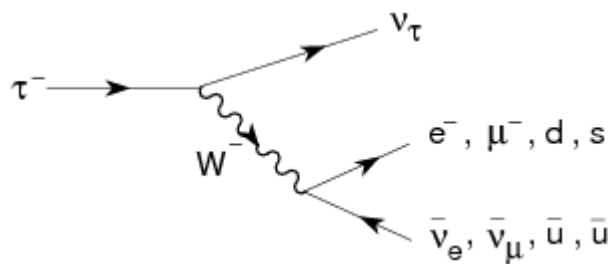


# $\tau$ lepton

|        | Particules de matière (fermions)  |   |   | Particules d'interactions   | boson de masse                                  |
|--------|---|---|---|---|---|
|        | I   | II  | III   |   |   |
| QUARKS | 2.4 MeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>u</b><br>up                                  | 1.27 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>c</b><br>charm                              | 171.2 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>t</b><br>top                               | 0<br>0<br>1<br><b><math>\gamma</math></b><br>photon               | 125 GeV<br>0<br>0<br><b>H</b><br>boson de Higgs |
|        | 4.8 MeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>d</b><br>down                                | 104 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>s</b><br>strange                             | 4.2 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>b</b><br>bottom                              | 0<br>0<br>1<br><b>g</b><br>gluon                                  |   |
|        | <2.2 eV<br>0<br>1/2<br><b><math>\nu_e</math></b><br>neutrino électronique | <0.17 MeV<br>0<br>1/2<br><b><math>\nu_\mu</math></b><br>neutrino muonique | <15.5 MeV<br>0<br>1/2<br><b><math>\nu_\tau</math></b><br>neutrino tauique | 91.2 GeV<br>0<br>1<br><b><math>Z^0</math></b><br>boson Z          |   |
|        | 511 KeV<br>-1<br>1/2<br><b>e</b><br>électron                              | 105.7 MeV<br>-1<br>1/2<br><b><math>\mu</math></b><br>muon                 | 1.777 GeV<br>-1<br>1/2<br><b><math>\tau</math></b><br>tau                 | 80.4 GeV<br>$\pm 1$<br>1<br><b><math>W^\pm</math></b><br>bosons W |   |
|        |   |   |   | BOSONS DE JAUGE   |   |
|        |   |   |   |   |   |

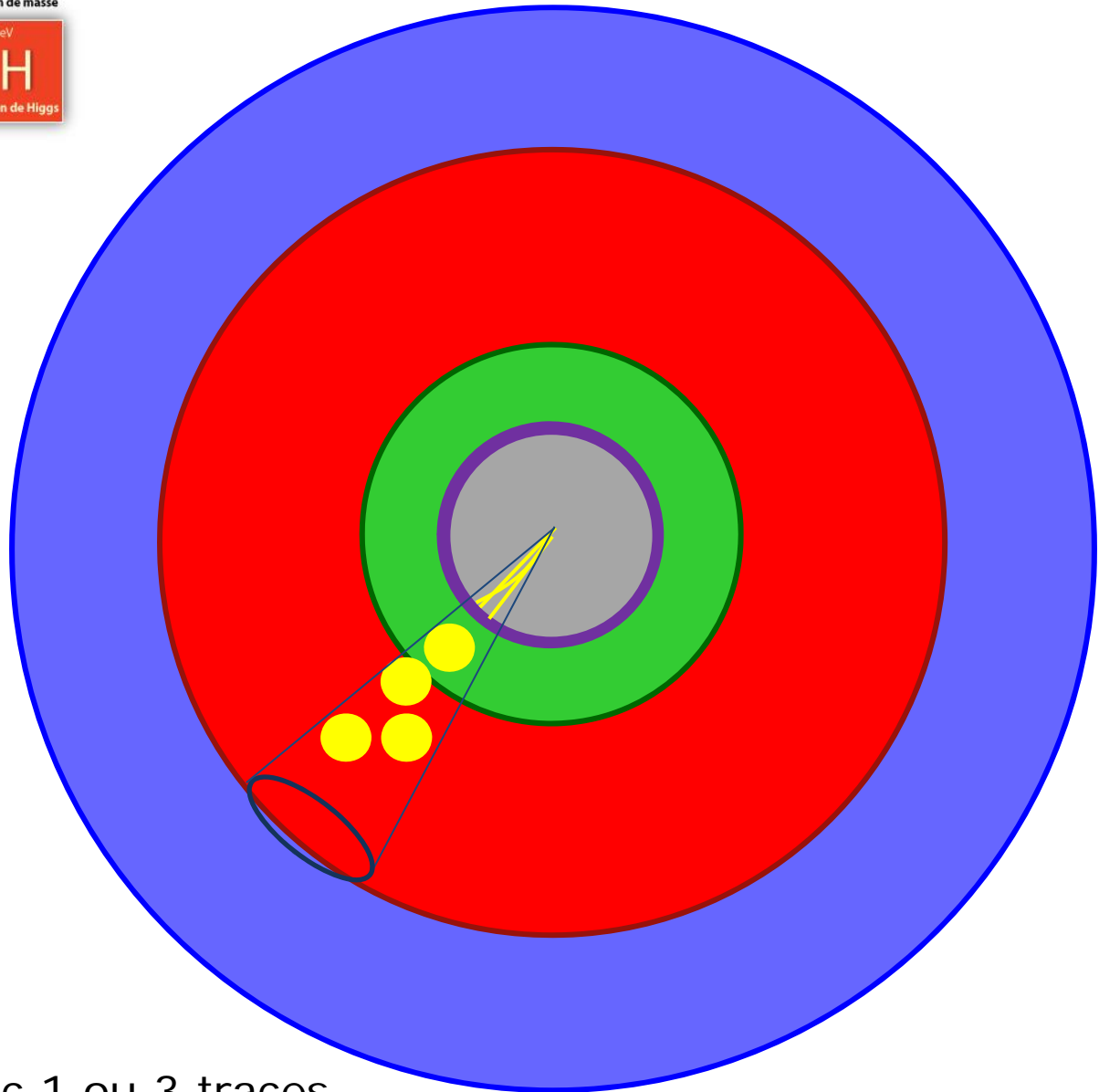
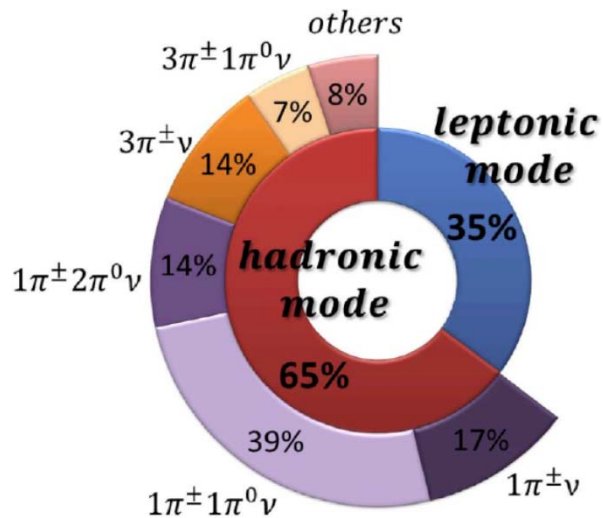


Désintégration dans le tube à vide ( $c\tau_\tau = 87\mu\text{m}$ )



# $\tau$ lepton

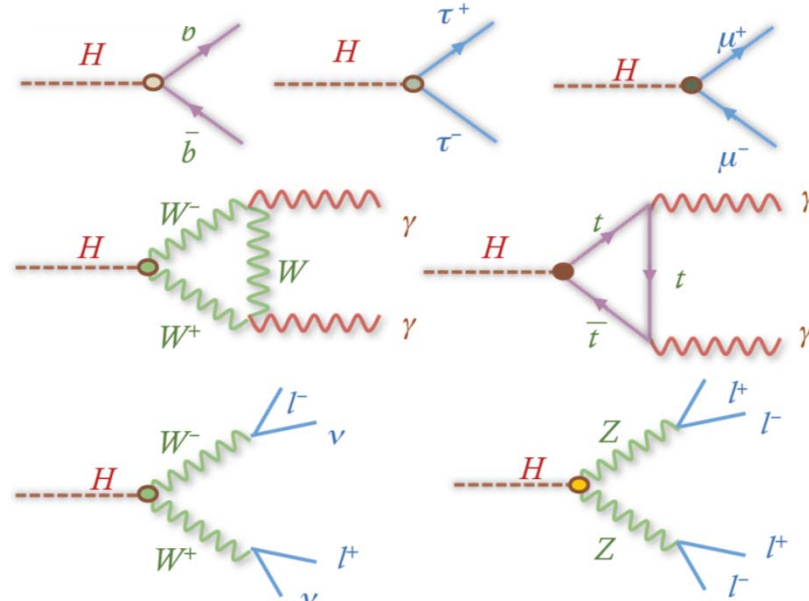
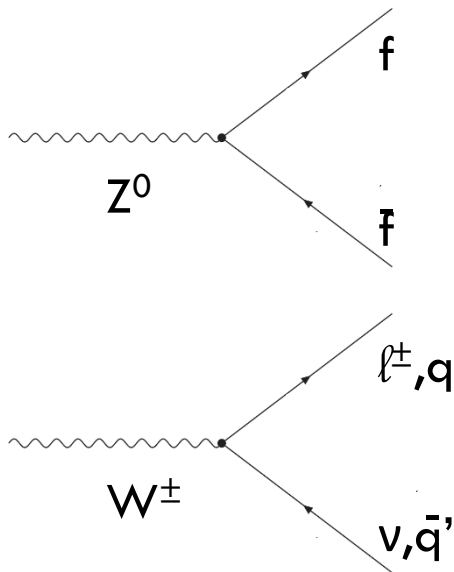
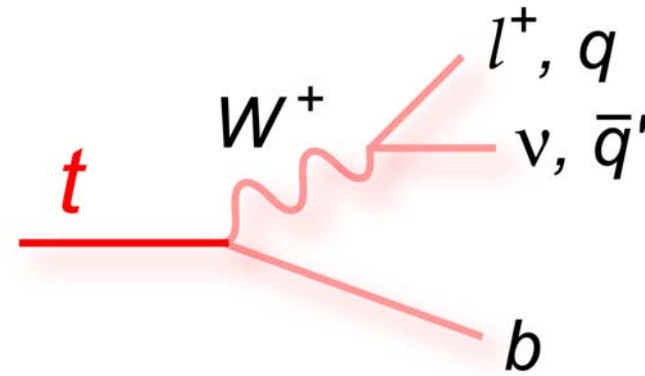
|         | Particules de matière (fermions)  |   |   | Particules d'interactions   | boson de masse                                  |
|---------|---|---|---|---|---|
|         | I   | II  | III   |   |   |
| QUARKS  | 2.4 MeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>u</b><br>up                                  | 1.27 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>c</b><br>charm                              | 171.2 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>t</b><br>top                               | 0<br>0<br>1<br><b><math>\gamma</math></b><br>photon               | 125 GeV<br>0<br>0<br><b>H</b><br>boson de Higgs |
|         | 4.8 MeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>d</b><br>down                                | 104 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>s</b><br>strange                             | 4.2 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>b</b><br>bottom                              | 0<br>0<br>1<br><b>g</b><br>gluon                                  |   |
|         | <2.2 eV<br>0<br>1/2<br><b><math>\nu_e</math></b><br>neutrino électronique | <0.17 MeV<br>0<br>1/2<br><b><math>\nu_\mu</math></b><br>neutrino muonique | <15.5 MeV<br>0<br>1/2<br><b><math>\nu_\tau</math></b><br>neutrino tauique | 91.2 GeV<br>0<br>1<br><b><math>Z^0</math></b><br>boson Z          |   |
|         | 511 KeV<br>-1<br>1/2<br><b>e</b><br>électron                              | 105.7 MeV<br>-1<br>1/2<br><b><math>\mu</math></b><br>muon                 | 1.777 GeV<br>-1<br>1/2<br><b><math>\tau</math></b><br>tau                 | 80.4 GeV<br>$\pm 1$<br>1<br><b><math>W^\pm</math></b><br>bosons W |   |
|         |   |   |   |   |   |
|         |   |   |   |   |   |
| LEPTONS |   |   |   |   |   |



Hadronique  $\tau$ : jet étroit avec 1 ou 3 traces

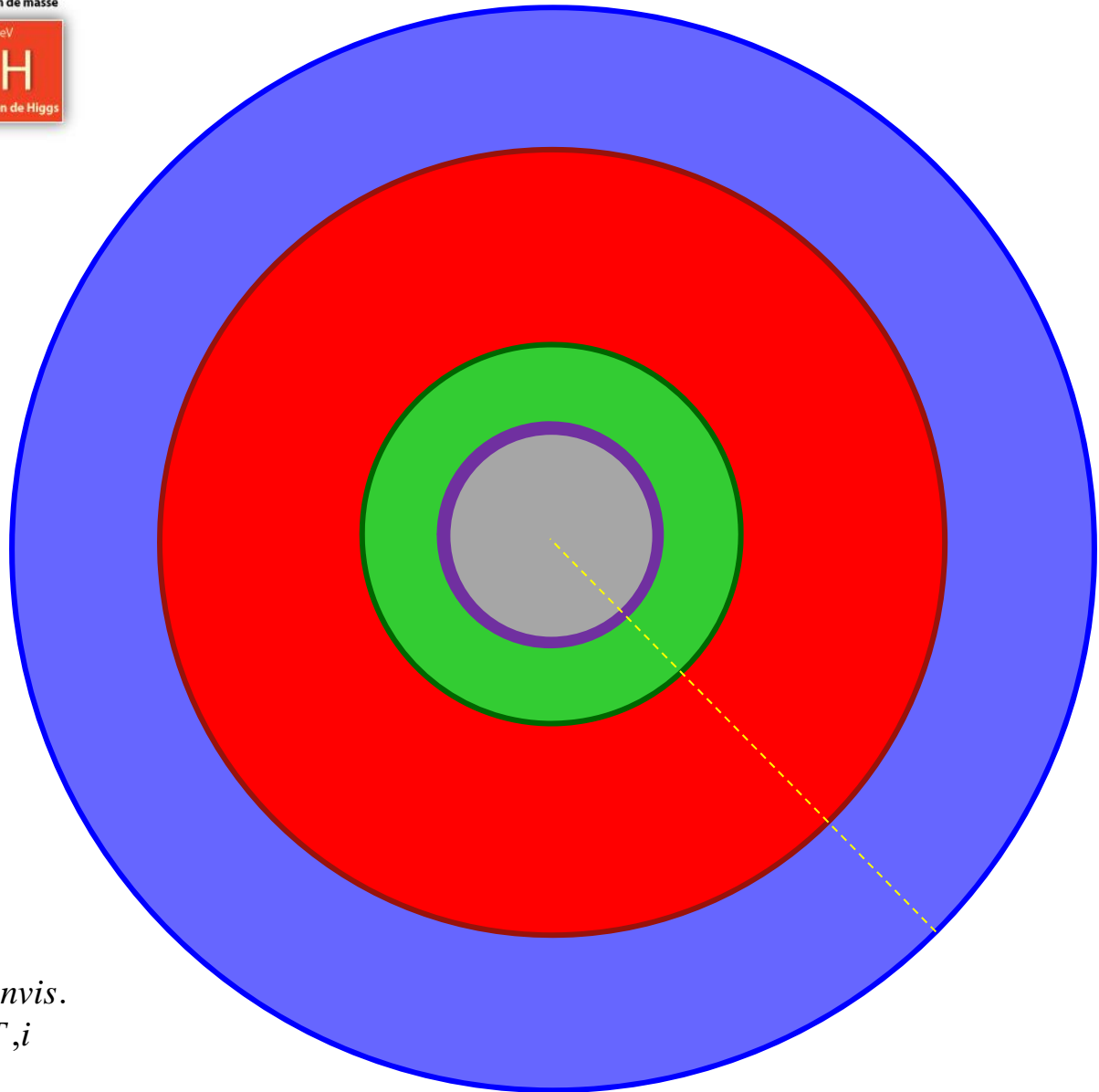
# Autres particules instables

|                                       | Particules de matière (fermions)                        |   |   | Particules d'interactions           | boson de masse                  |
|---------------------------------------|---|---|---|-------------------------------------|---------------------------------|
|                                       | I   | II  | III   |                                     |                                 |
| QUARKS                                | 2.4 MeV<br>+2/3<br>1/2<br>u<br>up                       | 1.27 GeV<br>+2/3<br>1/2<br>c<br>charm                   | 171.2 GeV<br>+2/3<br>1/2<br>t<br>top                    | 0<br>1<br>$\gamma$<br>photon        | 1.25 GeV<br>H<br>boson de Higgs |
|                                       | 4.8 MeV<br>-1/3<br>1/2<br>d<br>down                     | 104 GeV<br>-1/3<br>1/2<br>s<br>strange                  | 4.2 GeV<br>-1/3<br>1/2<br>b<br>bottom                   | 0<br>1<br>g<br>gluon                |                                 |
|                                       | <2.2 eV<br>0<br>1/2<br>$\nu_e$<br>neutrino électronique | <0.17 MeV<br>0<br>1/2<br>$\nu_\mu$<br>neutrino muonique | <15.5 MeV<br>0<br>1/2<br>$\nu_\tau$<br>neutrino tauique | 0<br>1<br>Z <sup>0</sup><br>boson Z |                                 |
| 511 KeV<br>-1<br>1/2<br>e<br>électron | 105.7 MeV<br>-1<br>1/2<br>$\mu$<br>muon                 | 1.777 GeV<br>-1<br>1/2<br>$\tau$<br>tau                 | ±1<br>W <sup>±</sup><br>bosons W                        |                                     |                                 |
| LEPTONS                               |   |   |   | BOSONS DE JAUGE                     |                                 |



# Energie transverse manquante

|         | Particules de matière (fermions)                                     |  |   | Particules d'interactions                               | boson de masse                                  |
|---------|--|--|---|---|---|
|         | I  | II   | III   |   |   |
| QUARKS  | 2.4 MeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>u</b><br>up                             | 1.27 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>c</b><br>charm                       | 171.2 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>t</b><br>top                       | 0<br>0<br>1<br><b>γ</b><br>photon                       | 125 GeV<br>0<br>0<br><b>H</b><br>boson de Higgs |
|         | 4.8 MeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>d</b><br>down                           | 104 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>s</b><br>strange                      | 4.2 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>b</b><br>bottom                      | 0<br>0<br>1<br><b>g</b><br>gluon                        |   |
|         | <2.2 eV<br>0<br>1/2<br><b>ν<sub>e</sub></b><br>neutrino électronique | <0.17 MeV<br>0<br>1/2<br><b>ν<sub>μ</sub></b><br>neutrino muonique | <15.5 MeV<br>0<br>1/2<br><b>ν<sub>τ</sub></b><br>neutrino tauique | 91.2 GeV<br>0<br>1<br><b>Z<sup>0</sup></b><br>boson Z   |   |
| LEPTONS | 511 KeV<br>-1<br>1/2<br><b>e</b><br>électron                         | 105.7 MeV<br>-1<br>1/2<br><b>μ</b><br>muon                         | 1.777 GeV<br>-1<br>1/2<br><b>τ</b><br>tau                         | 80.4 GeV<br>±1<br>1<br><b>W<sup>±</sup></b><br>bosons W | BOSONS DE JAUGE                                 |



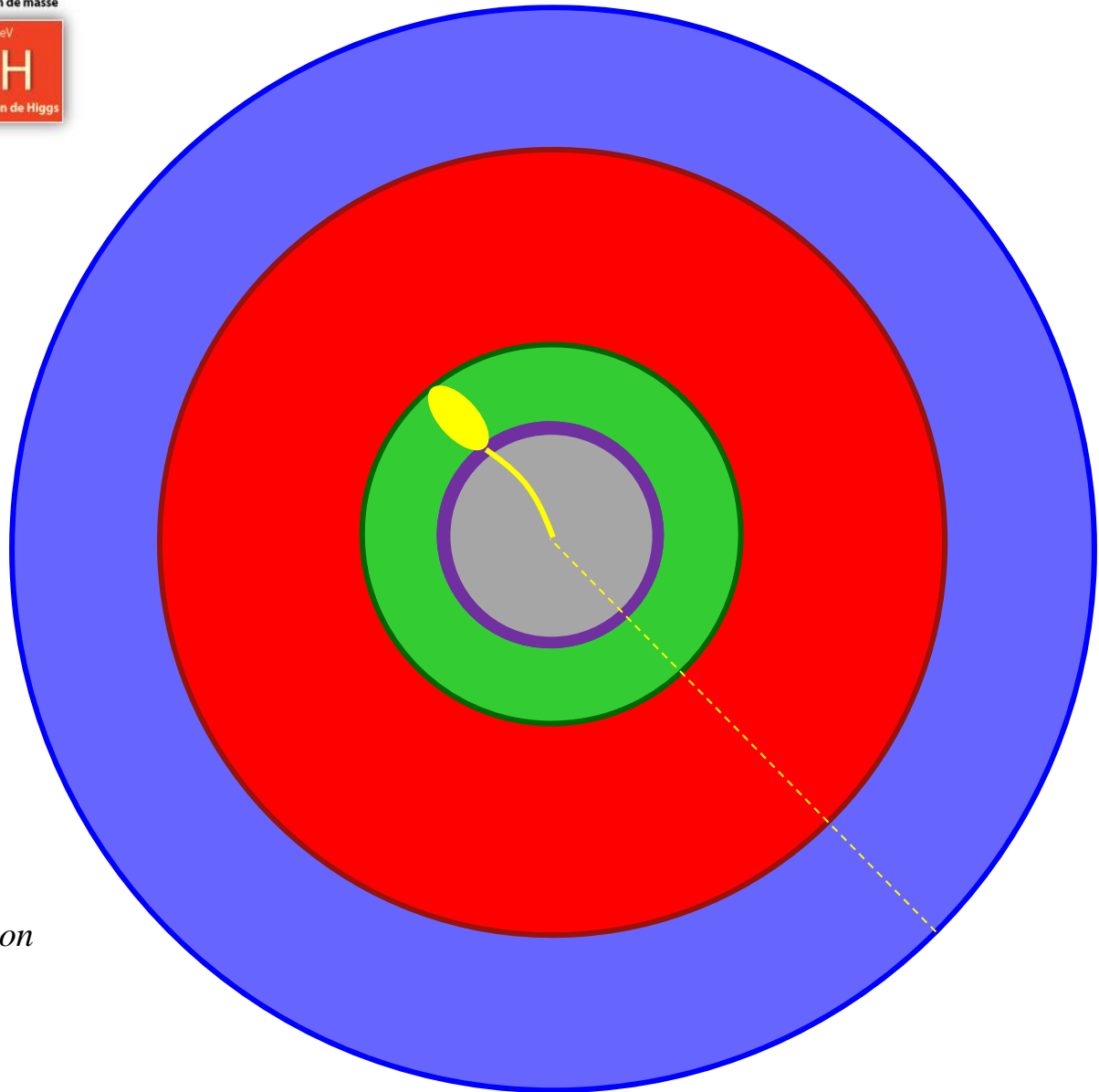
$$\sum_i \vec{p}_{T,i} \approx \vec{0}$$

$$\sum_i \vec{p}_{T,i}^{vis.} + \sum_i \vec{p}_{T,i}^{inv.} \approx \vec{0}$$

$$\vec{MET} = -\sum_i \vec{p}_{T,i}^{vis.} \approx \sum_i \vec{p}_{T,i}^{invis.}$$

# Energie transverse manquante

|         | Particules de matière (fermions)                                     |  |   | Particules d'interactions                               | boson de masse                                  |
|---------|--|--|---|---|---|
|         | I  | II   | III   |   |   |
| QUARKS  | 2.4 MeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>u</b><br>up                             | 1.27 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>c</b><br>charm                       | 171.2 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>t</b><br>top                       | 0<br>0<br>1<br><b>γ</b><br>photon                       | 125 GeV<br>0<br>0<br><b>H</b><br>boson de Higgs |
|         | 4.8 MeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>d</b><br>down                           | 104 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>s</b><br>strange                      | 4.2 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>b</b><br>bottom                      | 0<br>0<br>1<br><b>g</b><br>gluon                        |   |
|         | <2.2 eV<br>0<br>1/2<br><b>ν<sub>e</sub></b><br>neutrino électronique | <0.17 MeV<br>0<br>1/2<br><b>ν<sub>μ</sub></b><br>neutrino muonique | <1.55 MeV<br>0<br>1/2<br><b>ν<sub>τ</sub></b><br>neutrino tauique | 91.2 GeV<br>0<br>1<br><b>Z<sup>0</sup></b><br>boson Z   |   |
|         | 511 KeV<br>-1<br>1/2<br><b>e</b><br>électron                         | 105.7 MeV<br>-1<br>1/2<br><b>μ</b><br>muon                         | 1.777 GeV<br>-1<br>1/2<br><b>τ</b><br>tau                         | 80.4 GeV<br>±1<br>1<br><b>W<sup>±</sup></b><br>bosons W |   |
|         |  |  |   |   |   |
|         |  |  |   |   |   |
| LEPTONS |  |  |   |   | BOSONS DE JAUGE                                 |

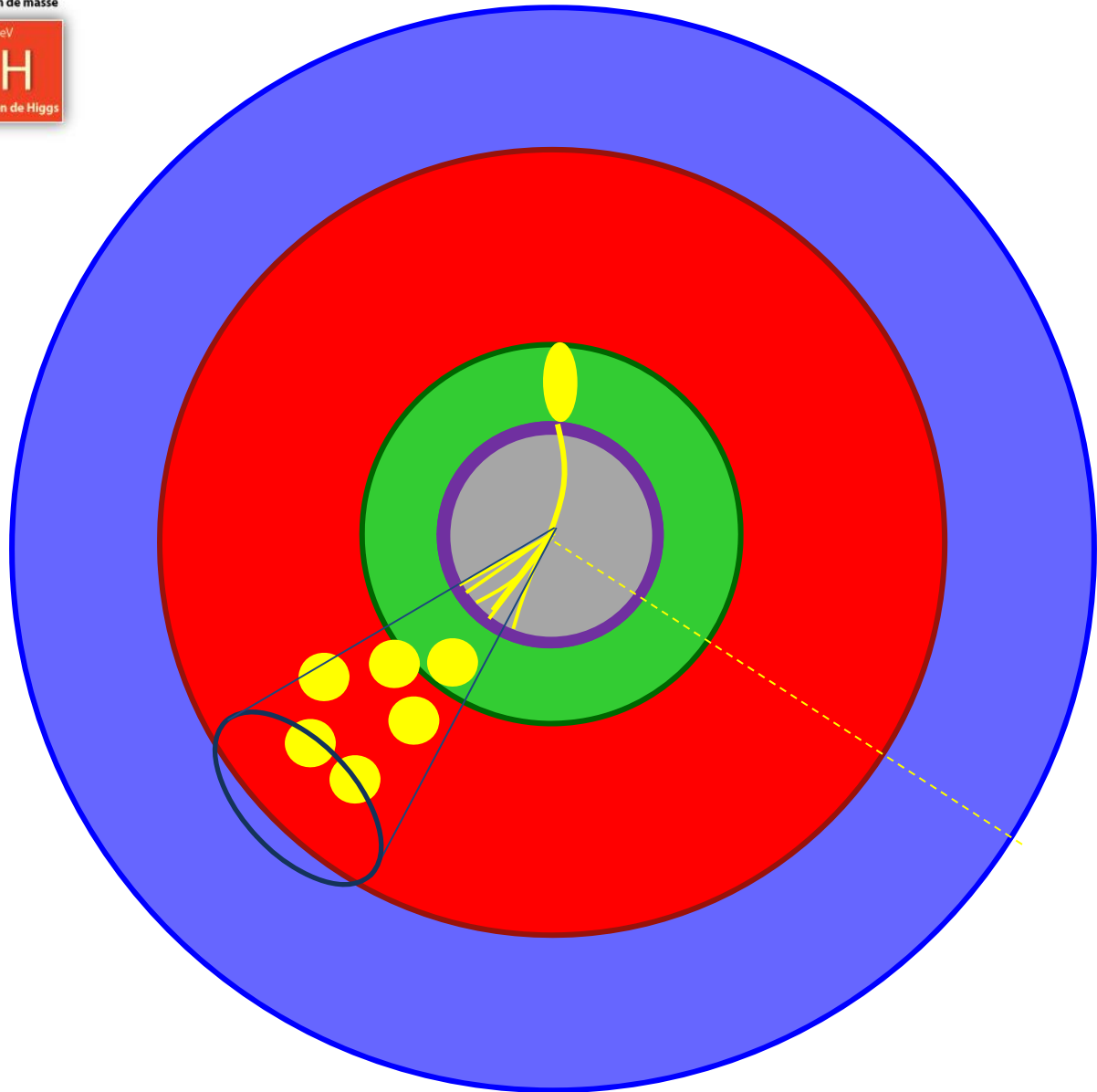


Pour cet événement:

$$\vec{MET} = \vec{p}_T^{neutrino} = -\vec{p}_T^{electron}$$

# Energie transverse manquante

|        | Particules de matière (fermions)                                     |  |   | Particules d'interactions                               | boson de masse                                  |
|--------|--|--|---|---|---|
|        | I  | II   | III   |   |   |
| QUARKS | 2.4 MeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>u</b><br>up                             | 1.27 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>c</b><br>charm                       | 171.2 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>t</b><br>top                       | 0<br>0<br>1<br><b>γ</b><br>photon                       | 125 GeV<br>0<br>0<br><b>H</b><br>boson de Higgs |
|        | 4.8 MeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>d</b><br>down                           | 104 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>s</b><br>strange                      | 4.2 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>b</b><br>bottom                      | 0<br>0<br>1<br><b>g</b><br>gluon                        |   |
|        | <2.2 eV<br>0<br>1/2<br><b>ν<sub>e</sub></b><br>neutrino électronique | <0.17 MeV<br>0<br>1/2<br><b>ν<sub>μ</sub></b><br>neutrino muonique | <15.5 MeV<br>0<br>1/2<br><b>ν<sub>τ</sub></b><br>neutrino tauique | 91.2 GeV<br>0<br>1<br><b>Z<sup>0</sup></b><br>boson Z   |   |
|        | 511 KeV<br>-1<br>1/2<br><b>e</b><br>électron                         | 105.7 MeV<br>-1<br>1/2<br><b>μ</b><br>muon                         | 1.777 GeV<br>-1<br>1/2<br><b>τ</b><br>tau                         | 80.4 GeV<br>±1<br>1<br><b>W<sup>±</sup></b><br>bosons W |   |
|        |  |  |   | BOSONS DE JAUGE   |   |
|        | LEPTONS  |  |   |   |   |



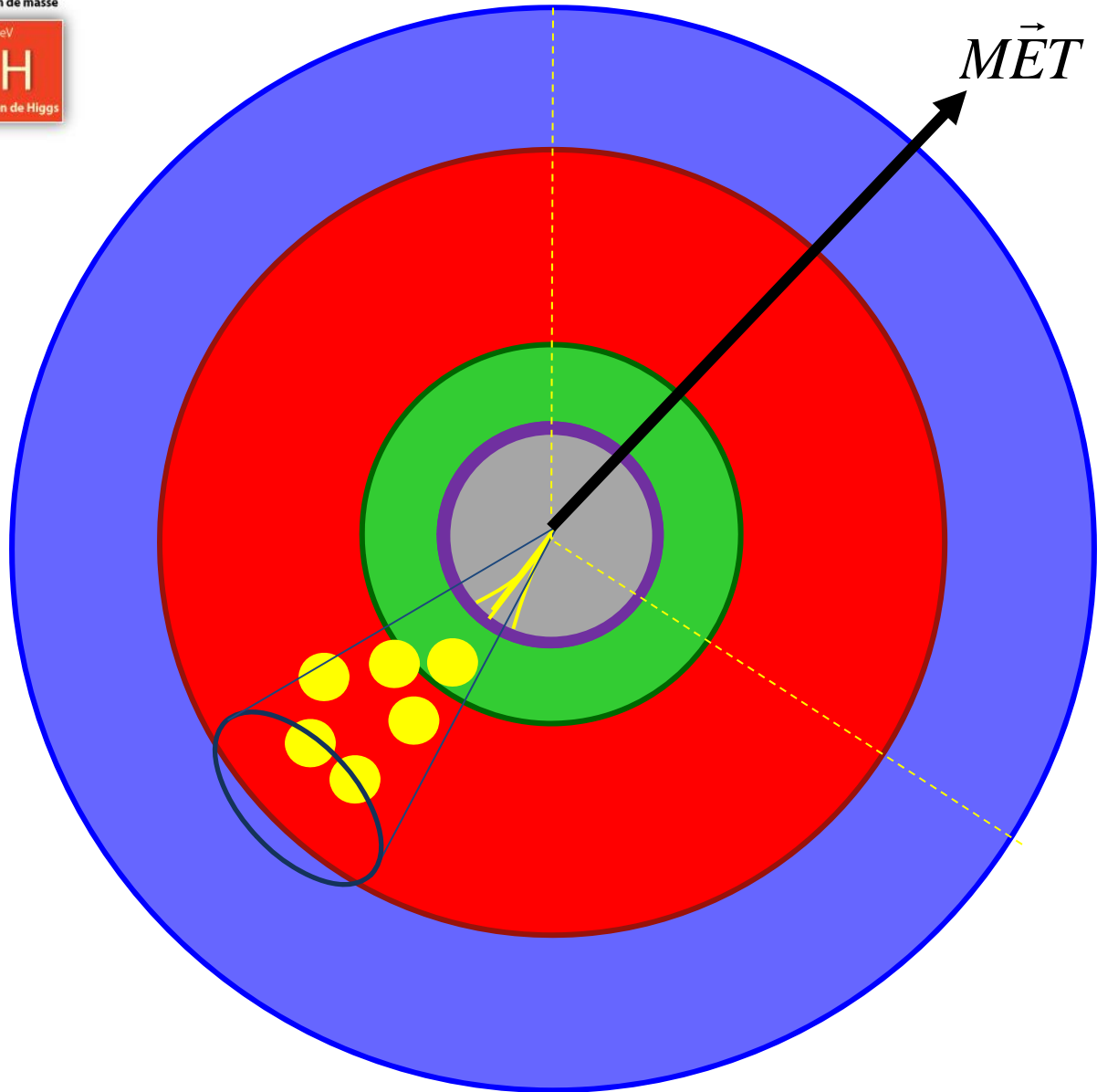
Pour cet événement:

$$\vec{MET} = -\vec{p}_T^{electron} - \vec{p}_T^{jet}$$



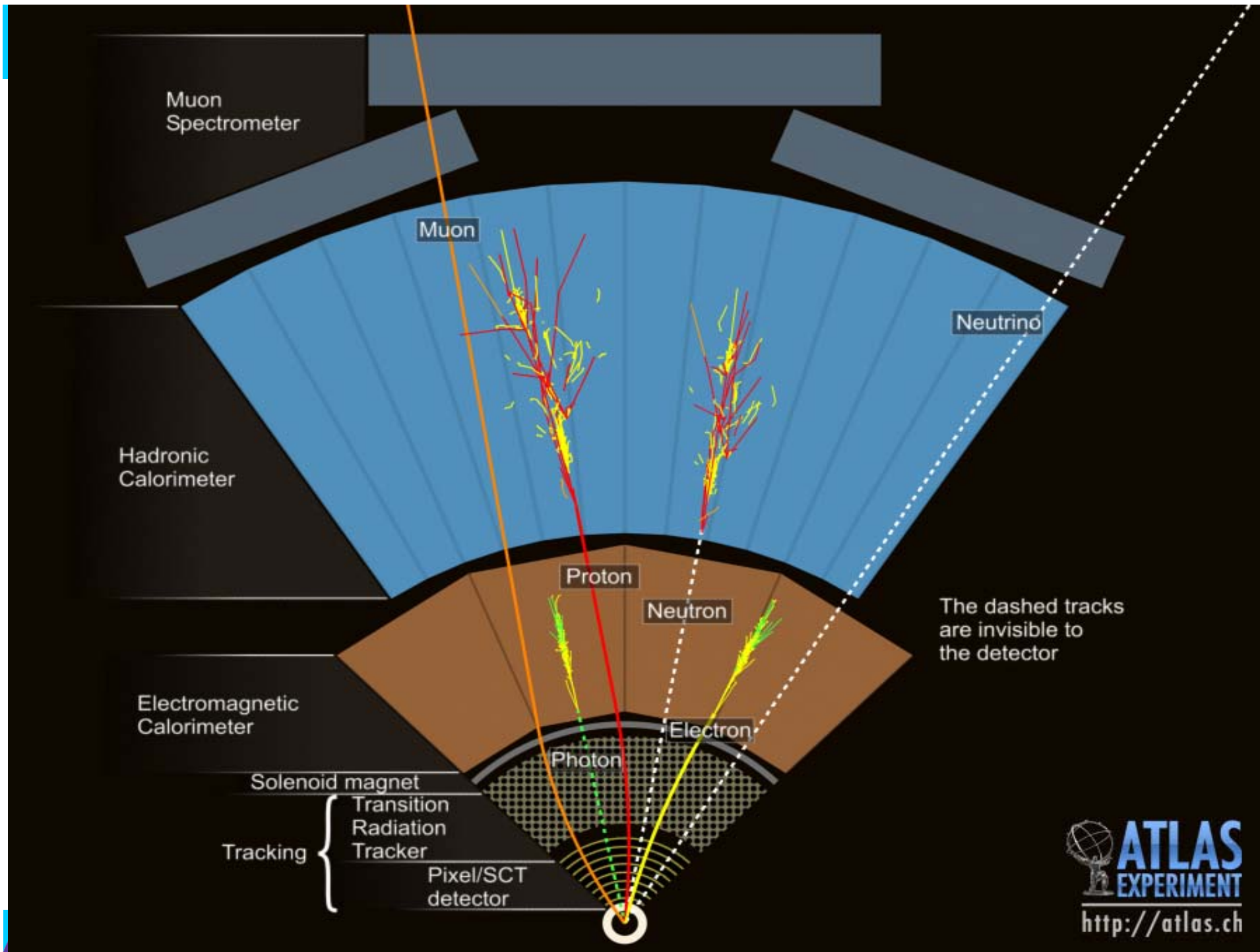
# Energie transverse manquante

|        | Particules de matière (fermions)                                     |  |   | Particules d'interactions                               | boson de masse                                  |
|--------|--|--|---|---|---|
|        | I  | II   | III   |   |   |
| QUARKS | 2.4 MeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>u</b><br>up                             | 1.27 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>c</b><br>charm                       | 171.2 GeV<br>+2/3<br>1/2<br><b>t</b><br>top                       | 0<br>0<br>1<br><b>γ</b><br>photon                       | 125 GeV<br>0<br>0<br><b>H</b><br>boson de Higgs |
|        | 4.8 MeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>d</b><br>down                           | 104 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>s</b><br>strange                      | 4.2 GeV<br>-1/3<br>1/2<br><b>b</b><br>bottom                      | 0<br>0<br>1<br><b>g</b><br>gluon                        |   |
|        | <2.2 eV<br>0<br>1/2<br><b>ν<sub>e</sub></b><br>neutrino électronique | <0.17 MeV<br>0<br>1/2<br><b>ν<sub>μ</sub></b><br>neutrino muonique | <15.5 MeV<br>0<br>1/2<br><b>ν<sub>τ</sub></b><br>neutrino tauique | 91.2 GeV<br>0<br>1<br><b>Z<sup>0</sup></b><br>boson Z   |   |
|        | 511 KeV<br>-1<br>1/2<br><b>e</b><br>électron                         | 105.7 MeV<br>-1<br>1/2<br><b>μ</b><br>muon                         | 1.777 GeV<br>-1<br>1/2<br><b>τ</b><br>tau                         | 80.4 GeV<br>±1<br>1<br><b>W<sup>±</sup></b><br>bosons W |   |
|        |  |  |   | BOSONS DE JAUGE   |   |
|        |  |  |   |   |   |



Pour cet événement:

$$\vec{MET} = -\vec{p}_T^{jet}$$



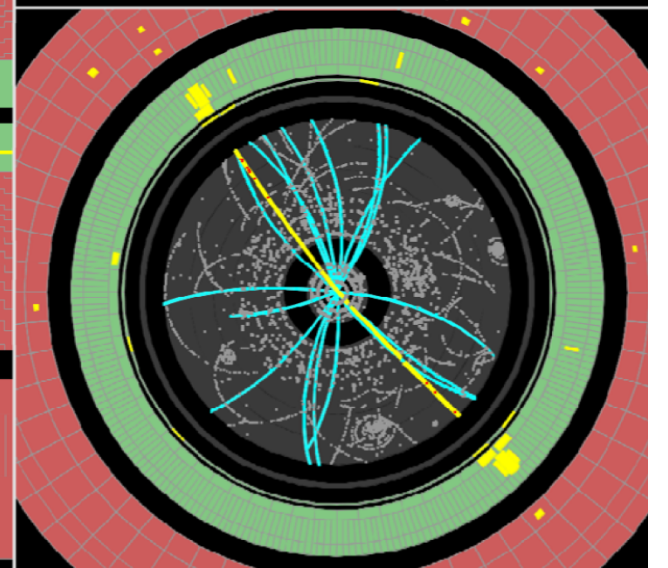
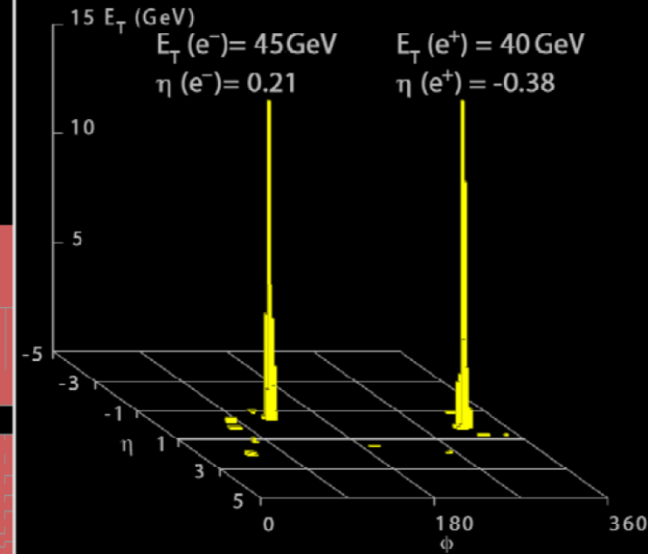


Run Number: 154817, Event Number: 968871

Date: 2010-05-09 09:41:40 CEST

$M_{ee} = 89 \text{ GeV}$

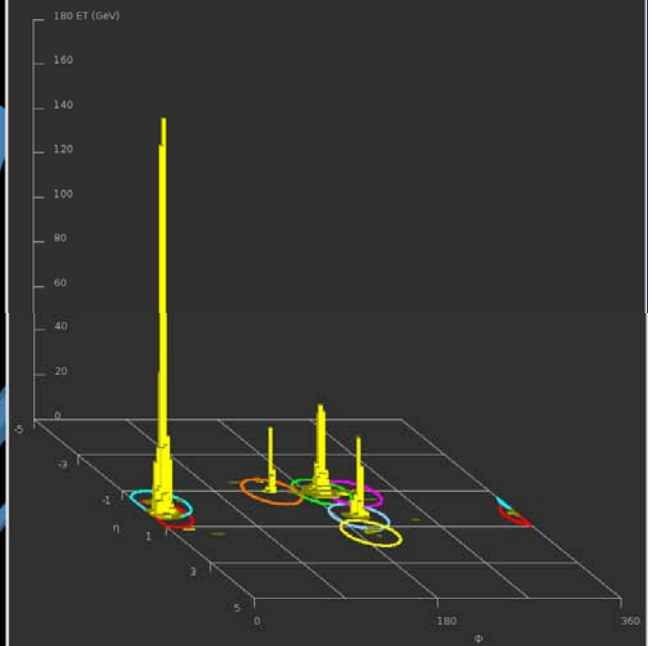
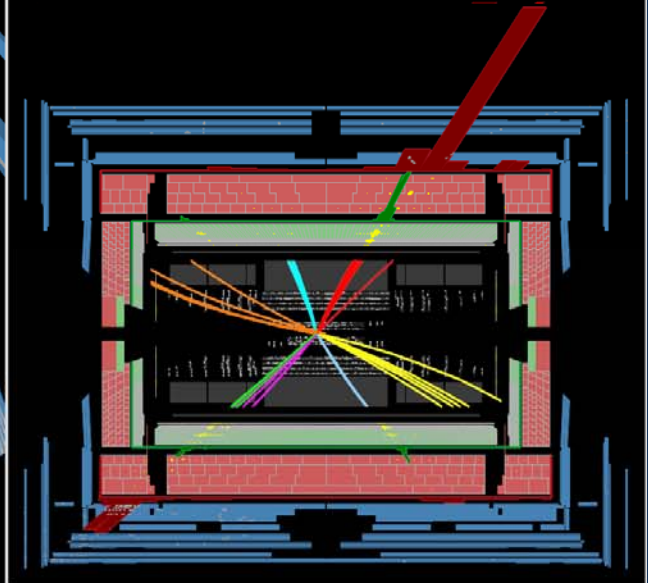
$Z \rightarrow ee$  candidate in 7 TeV collisions



Dijet candidate

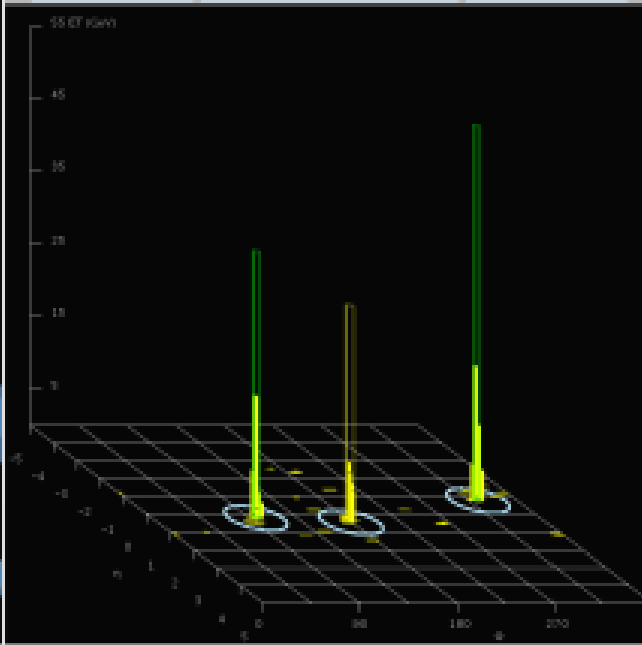
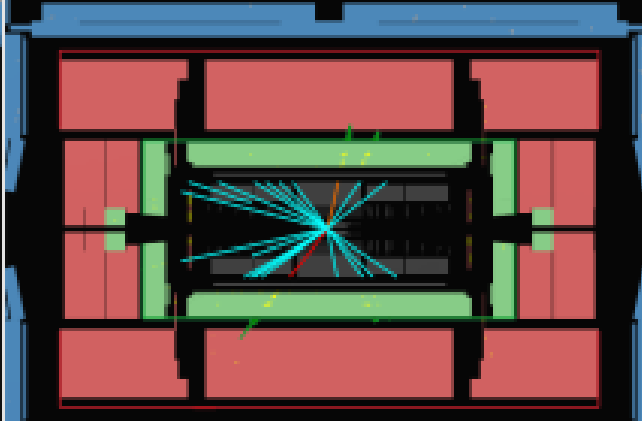
Run Number: 159224, Event Number: 3533152

Date: 2010-07-18 11:05:54 CEST



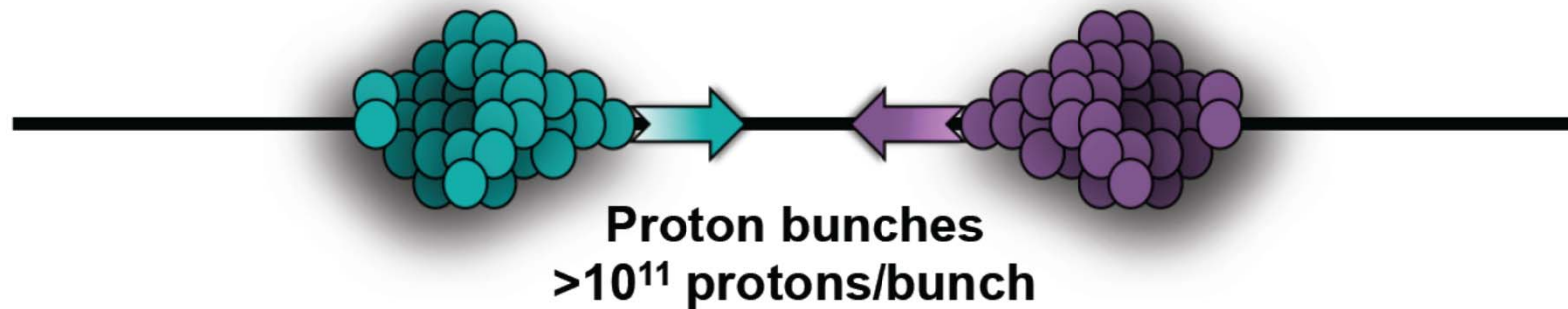
 **ATLAS**  
EXPERIMENT

# $Z(\rightarrow ee) + \gamma$ Candidate

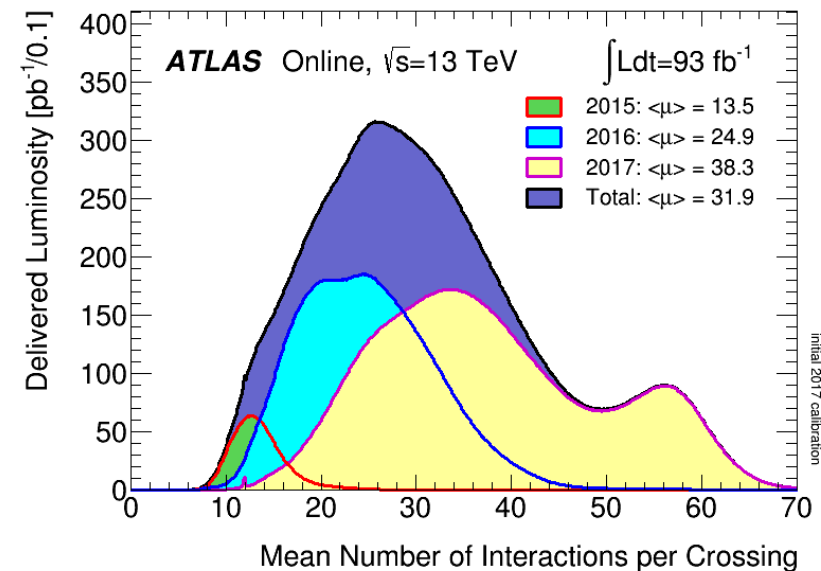


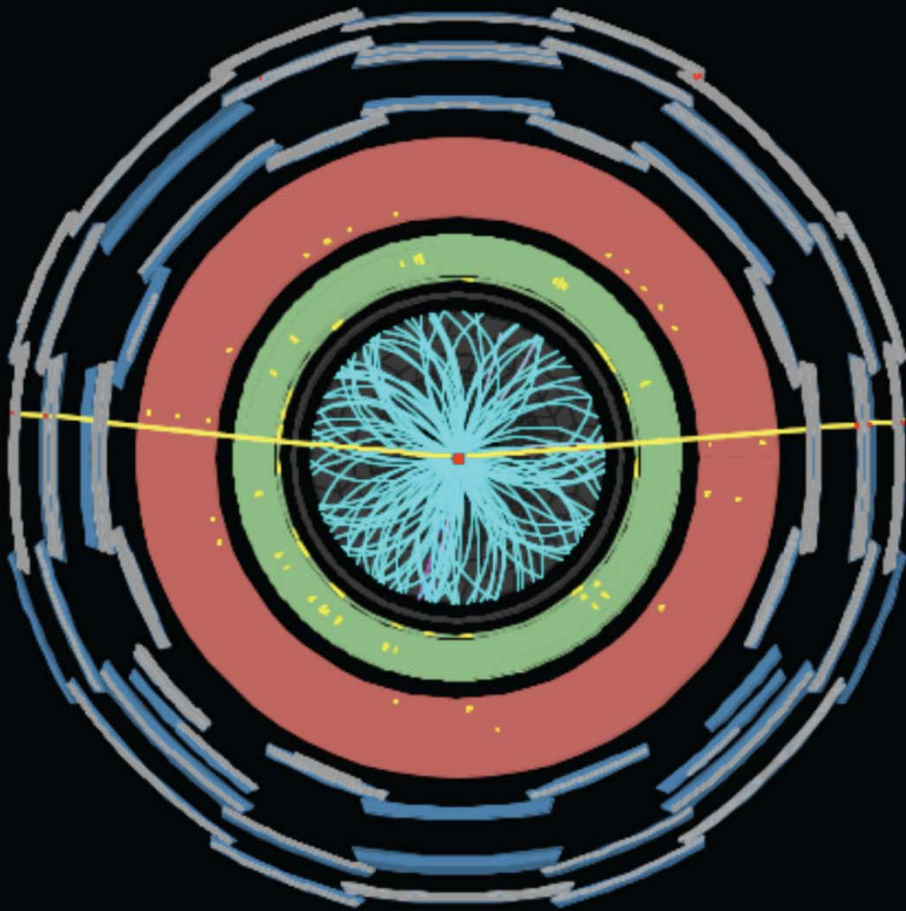
Run 167607 Event 28797604  
Date 2010-10-25 05:01:44 CEST

# L'empilement (pile-up)



- Jusqu'à  $\sim 60$  collisions au moment où les paquets de protons se croisent.
- Généralement, au plus une seule collision « intéressante » se produit et les collisions supplémentaires sont qualifiées d'événements d'« empilement »
- Les particules produites par ces événements d'empilement ont une faible impulsion transverse mais compliquent la reconstruction et la calibration du détecteur.

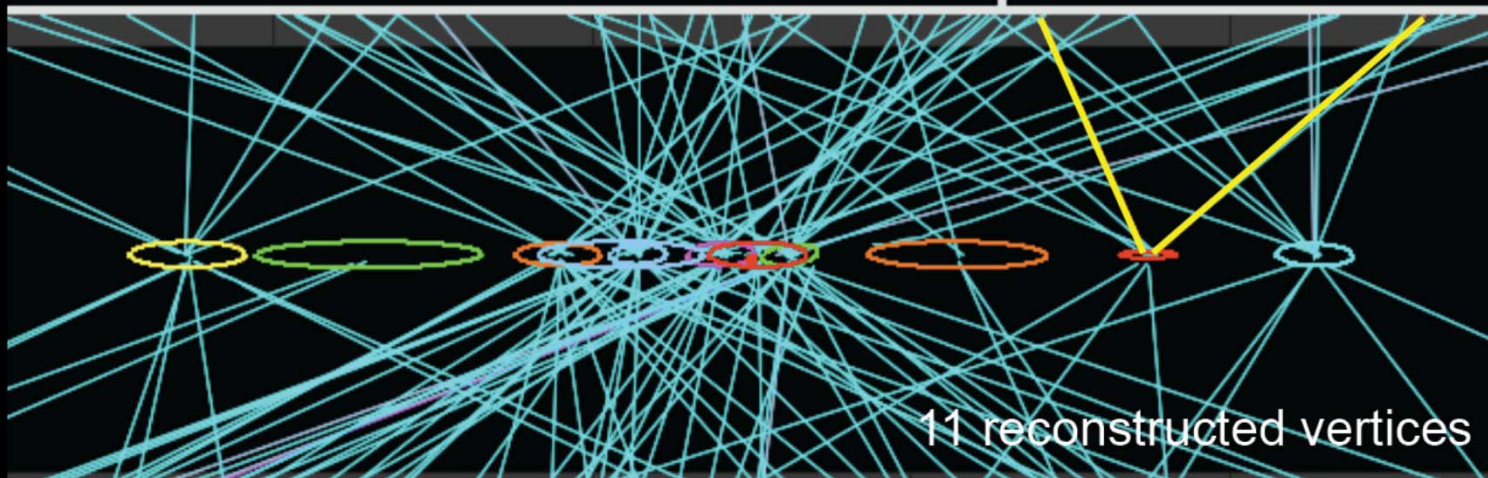
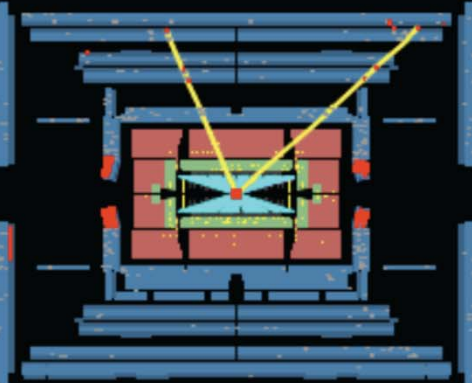




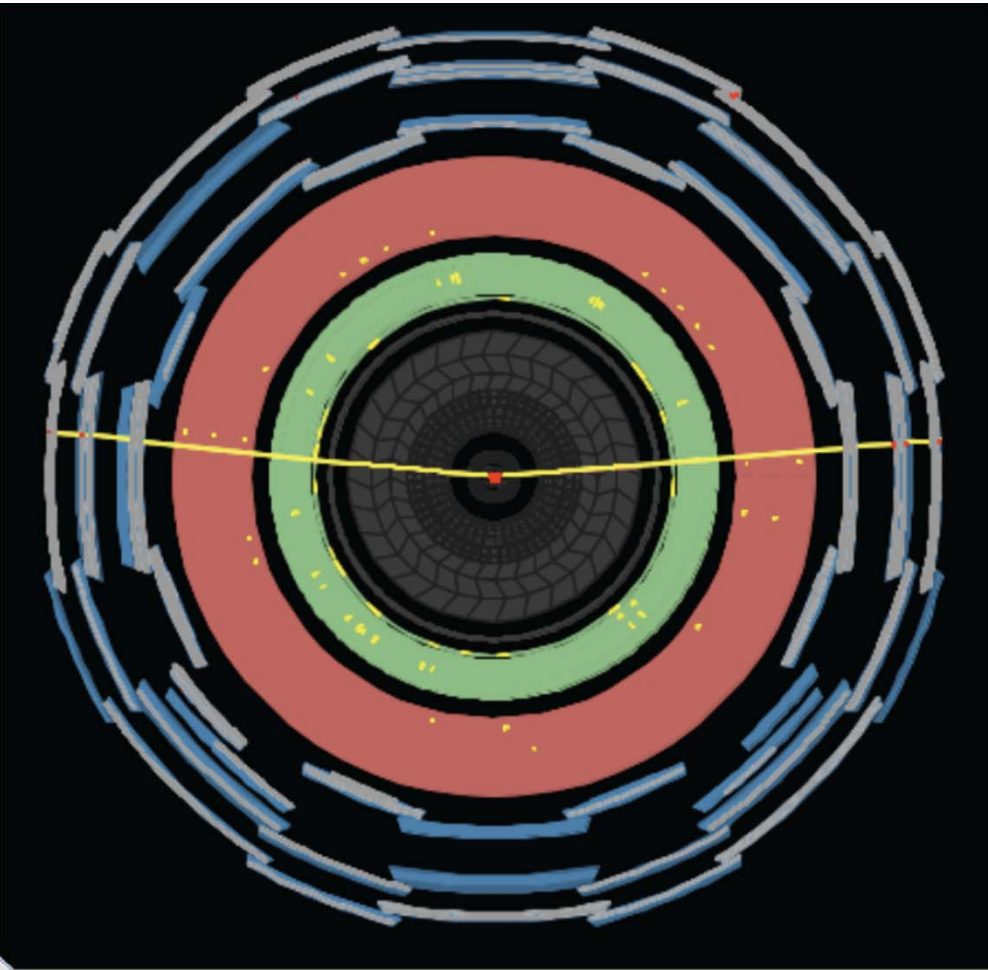
# ATLAS EXPERIMENT

Run Number: 180164, Event Number: 146351094

Date: 2011-04-24 01:43:39 CEST



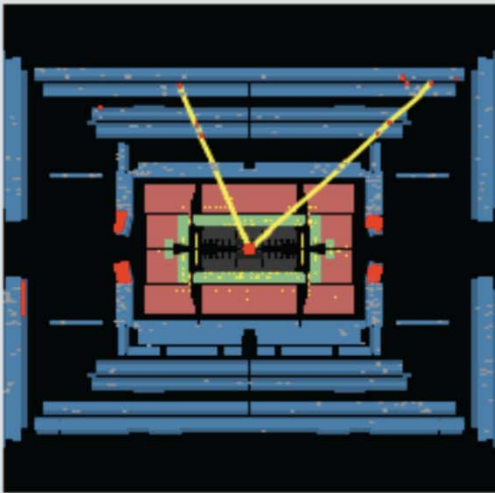
11 reconstructed vertices



# ATLAS EXPERIMENT

Run Number: 180164, Event Number: 146351094

Date: 2011-04-24 01:43:39 CEST

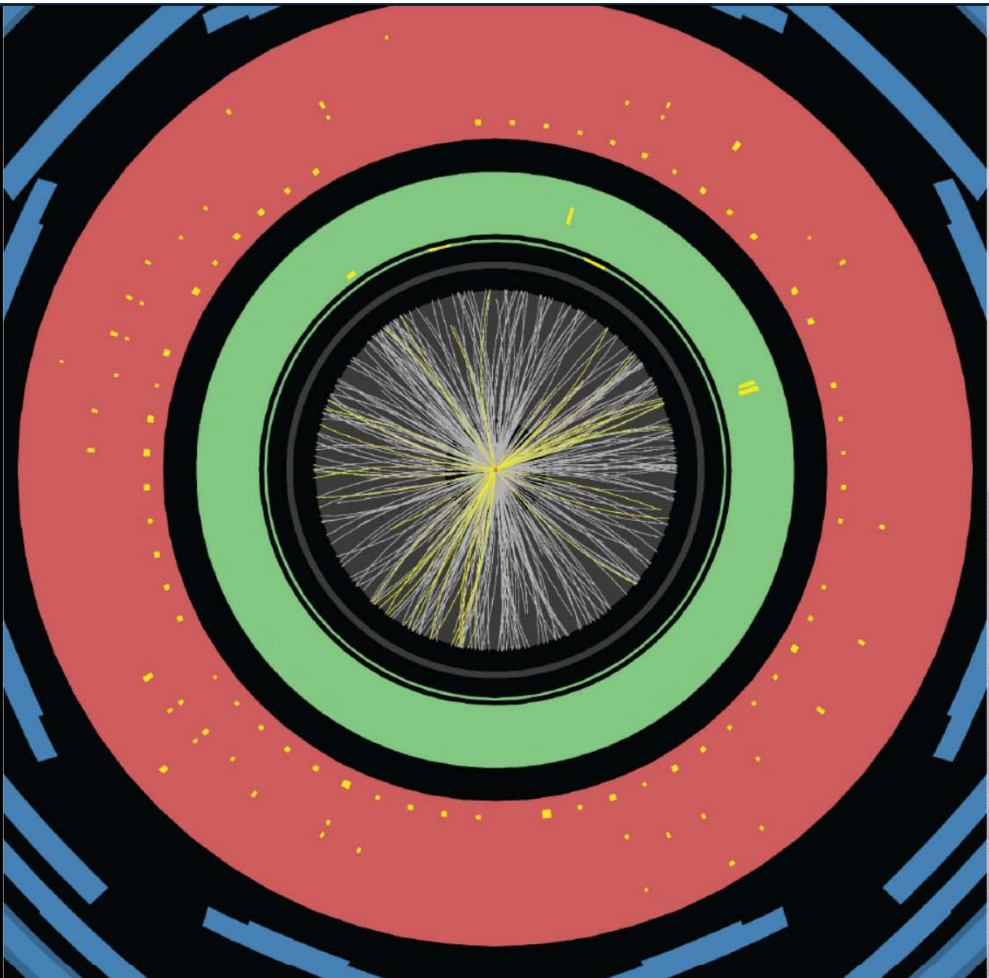


$P_T^{\text{trace}} > 10\text{GeV}$



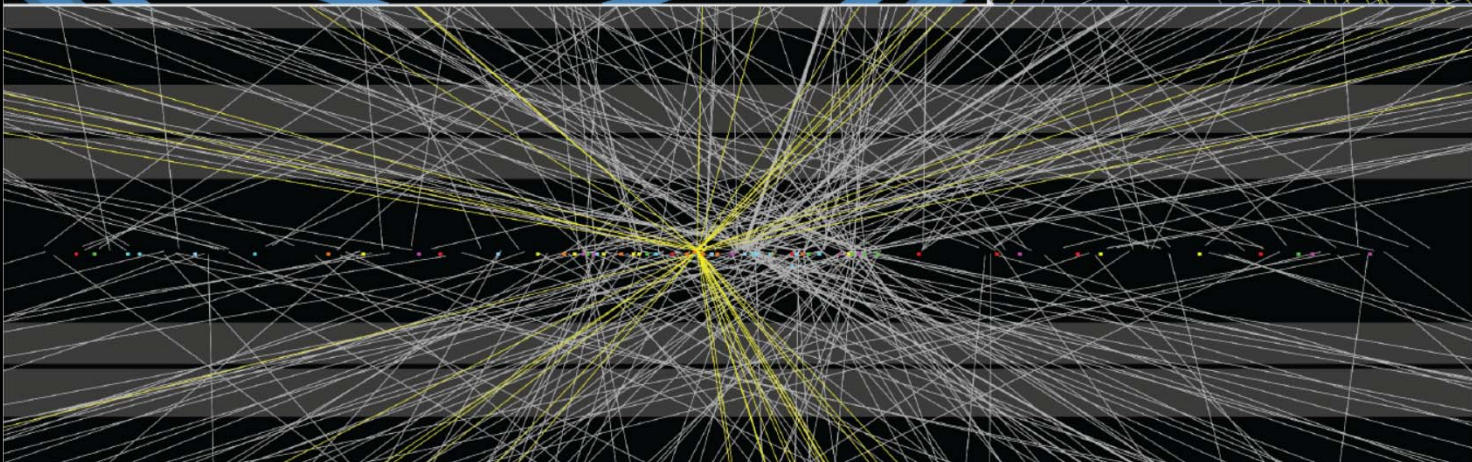
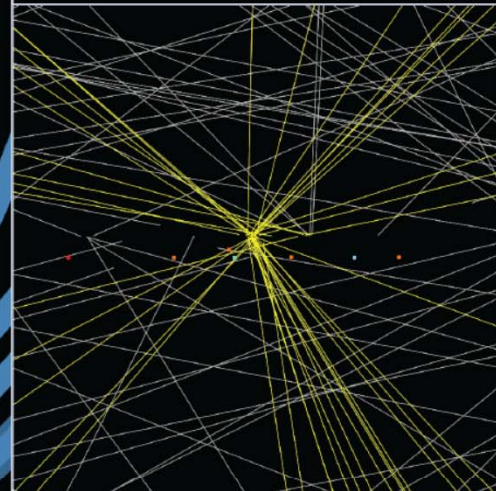
11 reconstructed vertices





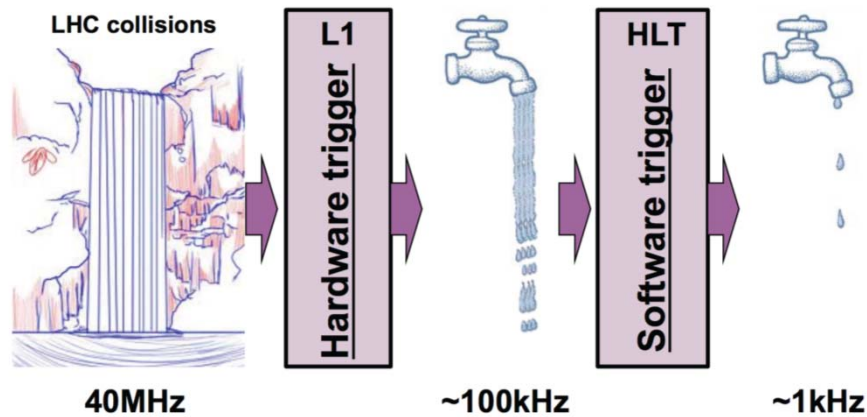
Run Number: 330160, Event Number: 391419735

Date: 2017-07-20 02:18:47 CEST

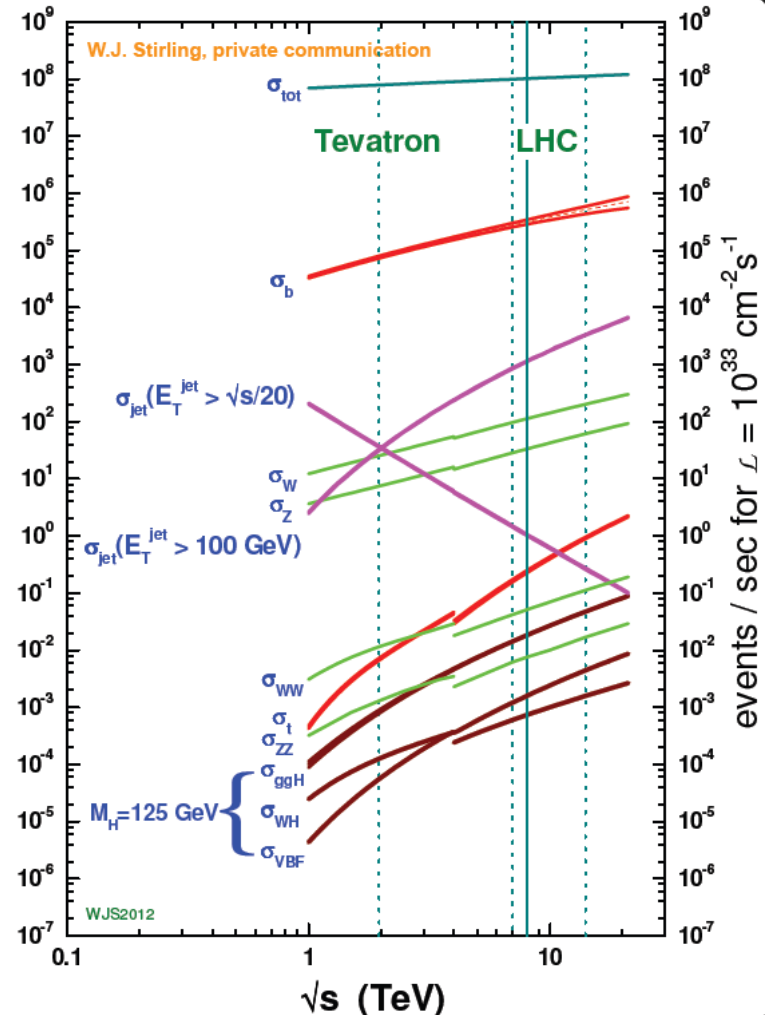


# Systeme de déclenchement (trigger)

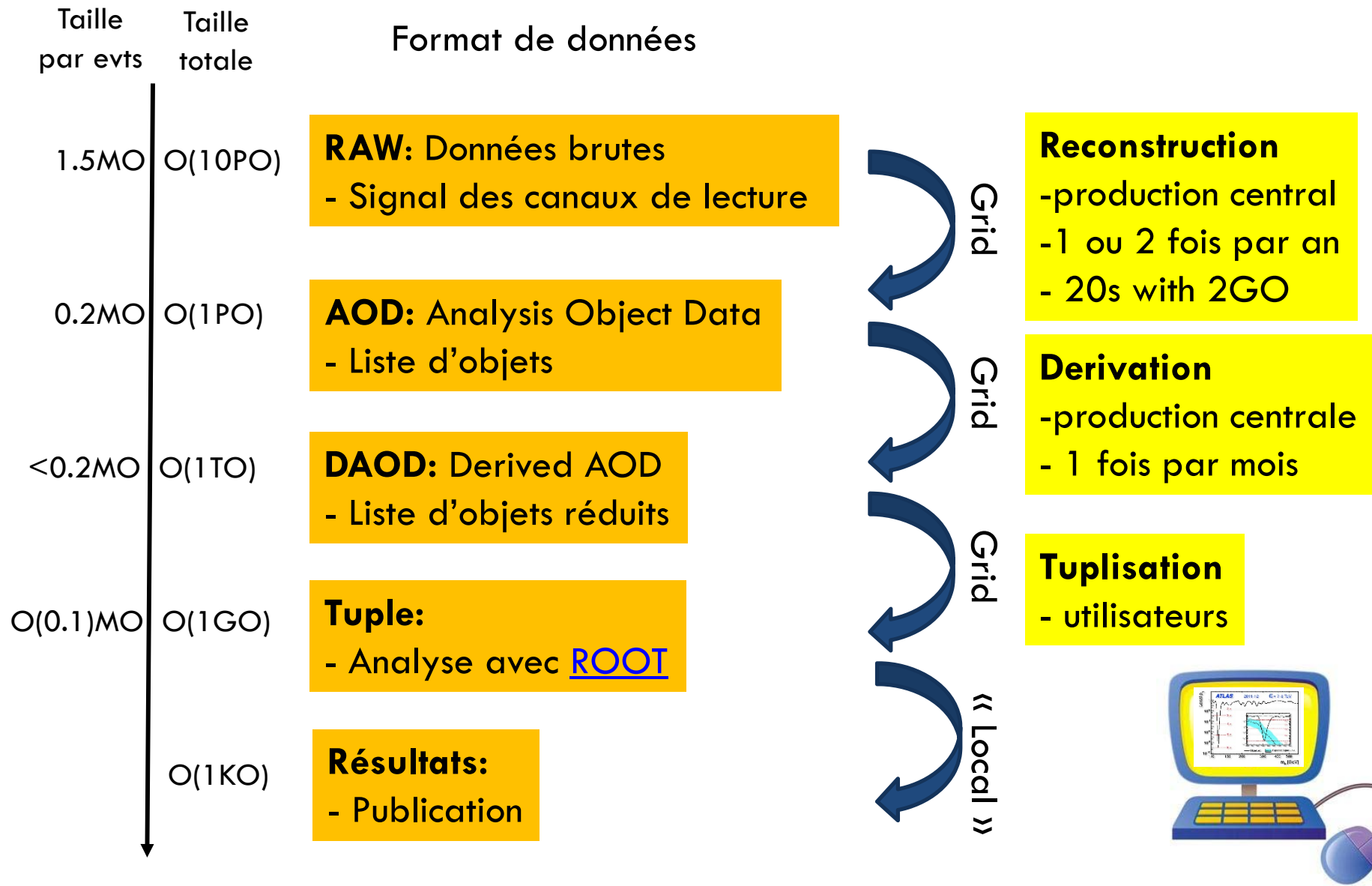
- Taux de croisement: 40MHz
  - 20 TO/s (4000 DVD)
  - Impossible de tout enregistrer
- Besoin de faire une sélection en ligne
  - ~1000 enregistrés/s (1GO/s)



- En 2016:
  - 8 milliard d'événements enregistrés
  - 12 PO (2.5 millions de DVD)



# Le modèle d'analyse de données d'ATLAS

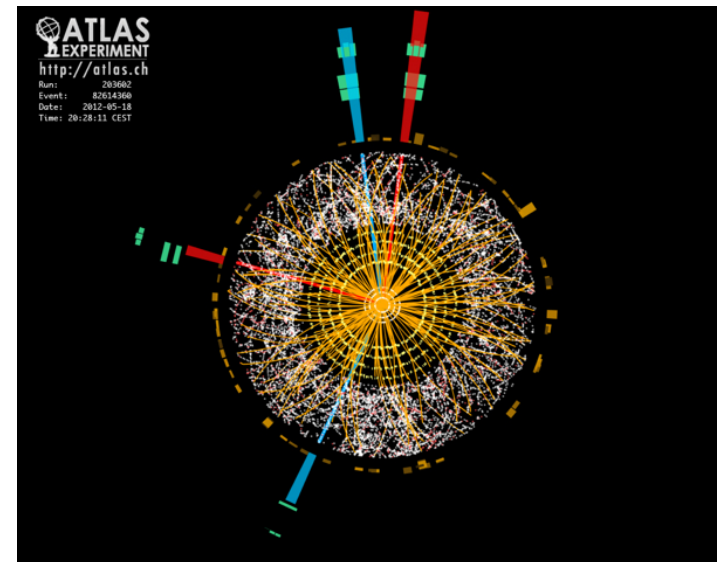


# La reconstruction

- Le détecteur mesure **des charges électriques ou des courants** dans chacun des canaux du détecteur
  - ~100 millions de canaux
- **Première étape:** reconstruction des **trajectoires des particules chargées** et des **amas d'énergie dans les calorimètres**
  - Nécessité de base de données: géométrie, calibration,...
- **Deuxième étape:** reconstruction **des objets physique** (vertex, électron, jets, MET, ...) et de calculer leurs propriétés cinématiques
- Les données sont organisées en « **événements** » correspondant à un croisement de paquet de protons du LHC
  - Une « image » de la collision
- Chaque événement est indépendant des autres  
→ parallélisation triviale

## Athena: le programme de reconstruction d'ATLAS

- 4 millions de lignes de code (C++ et python)
- Développé depuis ~2000
- 2000 packages
- 1000 développeurs
- Open source
- 200 algorithmes



# *La grille*

# La grille de calcul du LHC

- En 1999 il paraît déjà évident que le CERN n'aura jamais à lui seul la **puissance informatique** nécessaire pour **analyser les vastes quantités de données du LHC**.
- Par ailleurs, la plupart des laboratoires et universités qui travaillaient ensemble sur le LHC avaient accès à des **installations informatiques nationales ou régionales**.
- Le "Worldwide LHC Computing Grid" (WLCG) est un vaste **réseau mondial de centres de calcul** créée en 2002 qui transmettent, stockent, traitent et analysent les données du LHC en continu.
  - 42 pays et 170 centres de calcul
  - Plus de 8000 utilisateurs provenant des 4 expériences
  - 2 million de jobs par jour
  - 750 000 coeurs et >1000 PO de stockage
- **Avantage par rapport à un système centralisé unique:**
  - Des **copies des données** sont conservées en sûreté sur **plusieurs sites** différents et disponibles pour tous les scientifiques, indépendamment de leur lieu de travail.
  - **La grille est souple** : si un site a un problème, la grille redistribue les tâches informatiques vers d'autres sites, sans interruption dans le traitement des données.
  - Les centres de calcul sont situés dans différents fuseaux horaires, de sorte que la surveillance et le **support sont disponibles 24/7**.



# Tier0

## Tier0 (CERN+Budapest)

100 Gbit/s (3 DVD/s) entre les 2 sites

Stockage des données brutes

Première passe de reconstruction

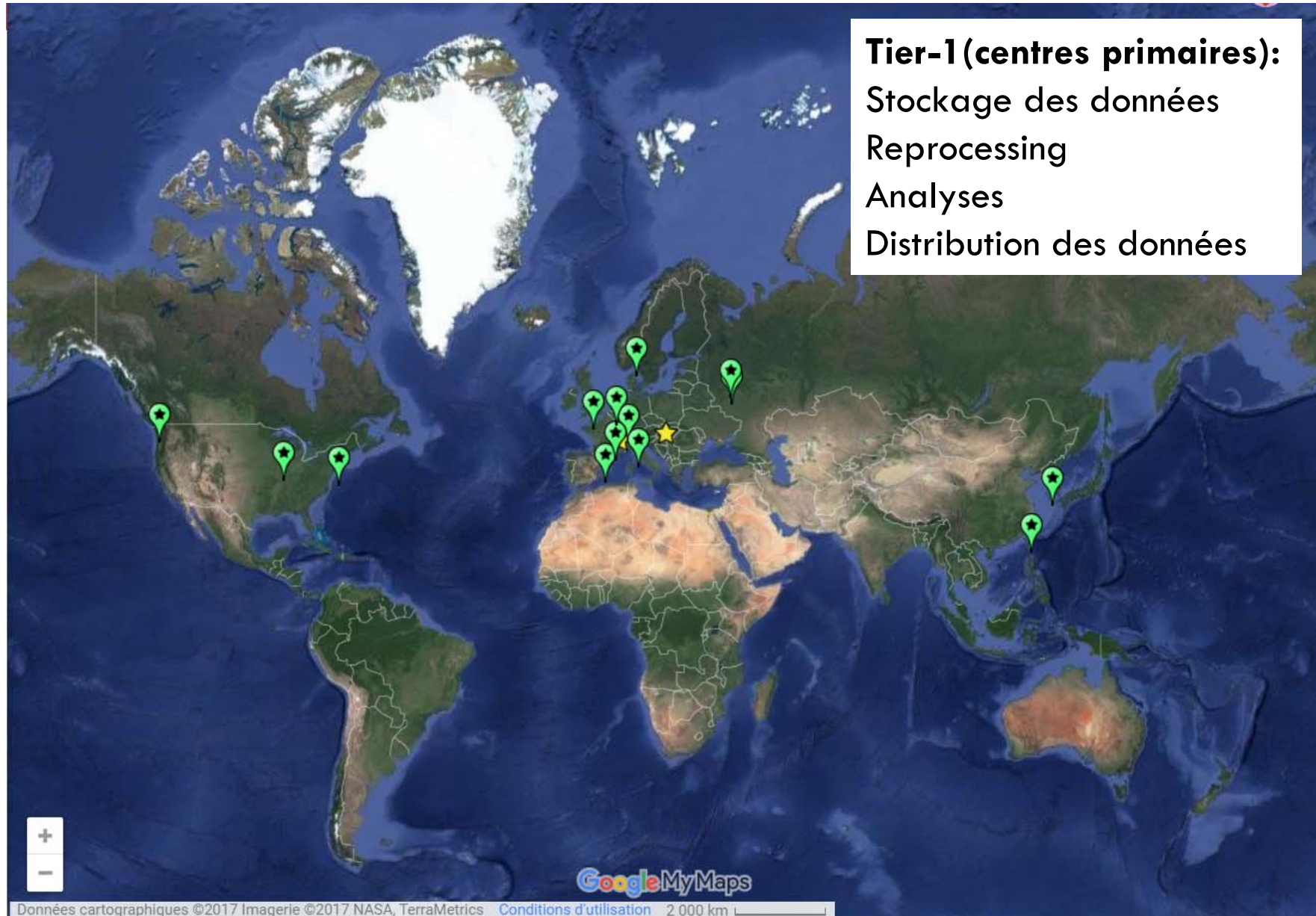
Distribution des données (10 Gbit/s)



Le Centre de données du CERN vu par un drone:  
<https://www.youtube.com/watch?v=dMwP7nEuDGA>

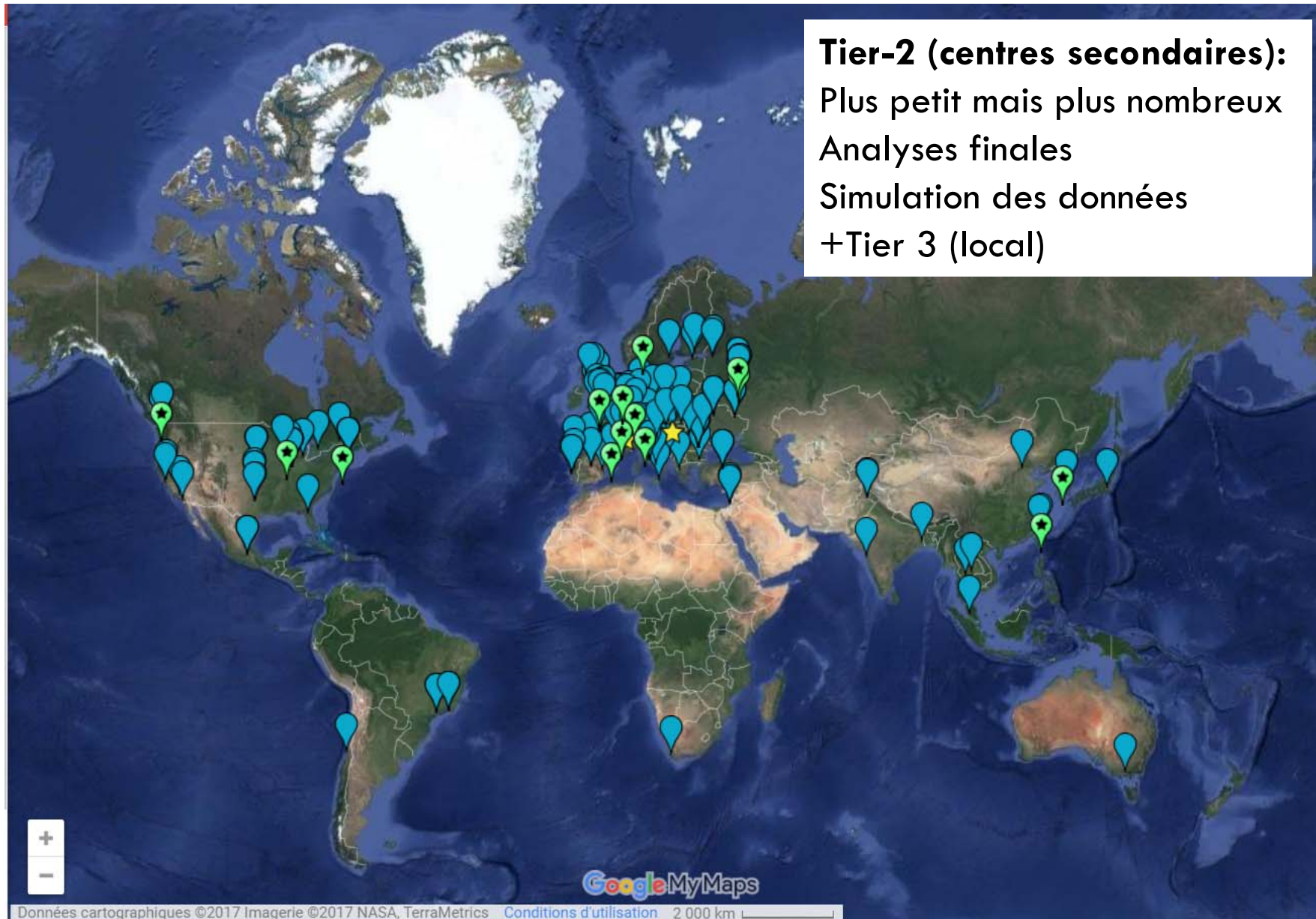
Données cartographiques ©2017 Imagerie ©2017 NASA, TerraMetrics Conditions d'utilisation 2 000 km

# Tier1



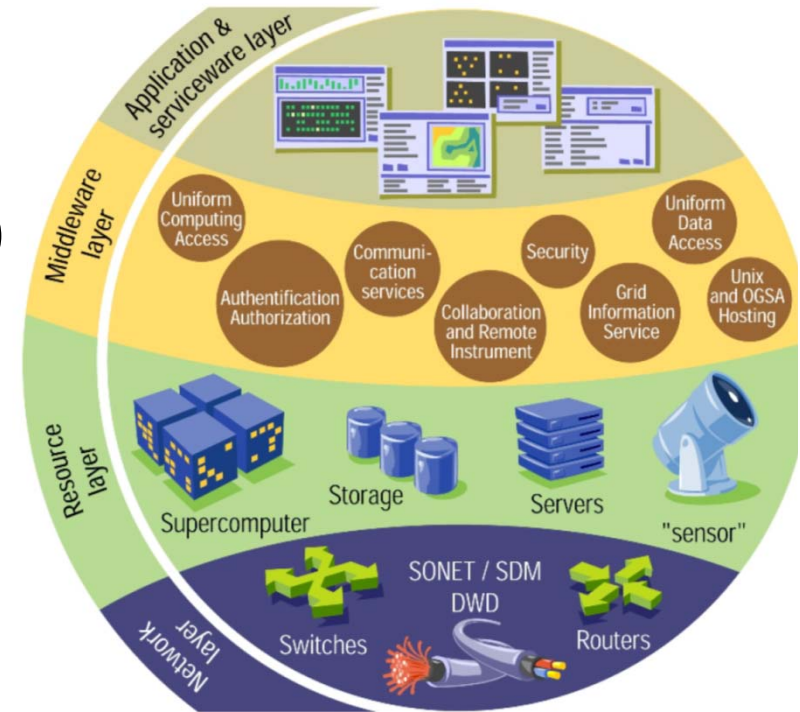


# Tier2



# La grille de calcul

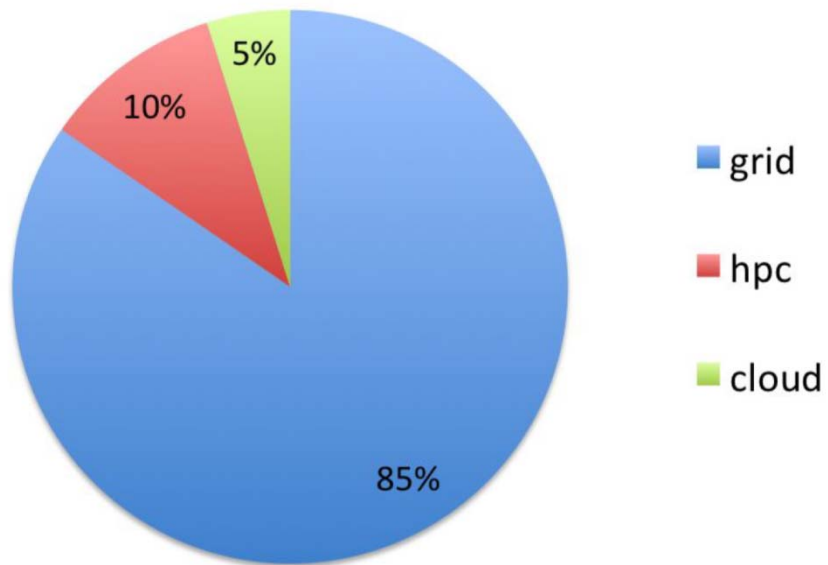
- **Couche application** : située au niveau le plus élevé qui comprend:
  - Types d'applications: scientifiques, techniques, gestion, financières, portails...
  - C'est la couche des utilisateurs de la grille.
- **Couche intergiciel** :
  - Ensemble de fonctions permettant aux ressources (serveurs, mémoires, réseaux, etc.) de participer à un contexte de grille unifié.
  - Ordonnancement (scheduling)
- **Couche ressources** :
  - Ordinateurs, systèmes de mémoire, catalogues de données électroniques, capteurs, télescopes
- **Couche réseau** :
  - Connectabilité des ressources sur la grille.
  - Niveau matériel



**Une grille de calcul donne l'illusion d'un ordinateur virtuel très puissant.**

# Utilisation

Wall Clock time per Resource Type



Wall Clock time per Activity

